



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ANTTI SUUTARINEN
VOIMALAITOSKANAVIEN KANNAKOINTIJÄRJESTELMÄ
Diplomityö

Tarkastaja: professori Asko Riita-
huhta
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Teknisten tieteiden tiedekunnan tie-
dekuntaneuvoston kokouksessa 05.
huhtikuuta 2014

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

SUUTARINEN, ANTTI: Voimalaitoskanavien kannakointijärjestelmä

Diplomityö, 74 sivua, 2 liitesivua

Elokuu 2014

Pääaine: Tuotantotekniikka

Tarkastaja: professori Asko Riitahuhta

Avainsanat: kanava, kannake, voimalaitos, modulointi, järjestelmä

Kanavien kannakointi on merkittävä voimalaitoksen suunnittelukohde. Hyvä kannake on rakenteeltaan luja, mutta samalla mahdollisimman kevyt ja riittävän yksinkertainen. Tämän työn tavoitteena on luoda pohjaa vakiodulle kannakointijärjestelmälle, ja sen periaatteita noudattaen saattaa yksi ratkaisu ideasta valmiiksi lujuuslaskentatyökaluksi.

Työ jakaantuu seuraaviin osuuksiin: Kirjallisuustutkimusosassa selvitetään yrityksen nykyistä tilannetta sekä pohditaan ratkaisujen sopivuutta työn teoreettisessa viitekehityksessä. Tässä osassa luodaan kokonaiskuvaa toteutuneista käytännöistä, etsitään ratkaisujen osatoiminnot ja kyseenalaistetaan totuttuja malleja. Konseptisuunnitteluosuudessa keskitytään pohtimaan nykykäytännöille vaihtoehtoisia menetelmiä ja rajaamaan tutkimuksen fokuksen sopivimpaan ratkaisukandidaattiin. Laskentaosuudessa saatetaan tutkimus päätökseen osoittamalla detaljitasolla suunnitellun ratkaisun toimivuus ja luodaan pohjaa kannakkeiden harmonisoinnille samoja periaatteita käyttäen kuin esitellyissä laskentaesimerkeissä.

Laskenta saatetaan yleisessä muodossaan funktiomuotoisena taulukkolaskentaohjelmalla toteutetuksi syöteperäiseksi laskentatyökaluksi, jossa käyttäjän syöttämät parametrit toteuttavat uudet laskentatulokset. Laskentatulosten perusteella työkalu antaa ehdotuksia sopiville kannakerakenteissa käytettäville palkkiprofiileille. Kanavakannakkeiden vakiointi on erittäin tärkeä kehityskohde, sillä vakiodut toimintatavat nopeuttavat suunnittelutyötä ja vaikuttavat suoraan myös taloudellisiin säästöihin. Laskenta koskee tämän työn osalta vain pääasiallista kehityskohdetta, tyypiltään yläpuolisesta tasosta kannakoitua kantikasta vaakasuuntaista kanavaa.

Tutkimus osoittaa, että kannakkeiden suunnittelua on mahdollista vakioda ja nopeuttaa. Laskentatyökalu toimii konseptisuunnittelussa muodostuneelle kannaketyypille ennalta määrättyin suunnittelurajoittein. Palkkiprofiilit ovat laskennan spesifisen luonteen takia rajattu tiettyihin syötevaihtoehtoihin, mutta erityistilanteiden kuten maanjäristysten laskentakuorma on mahdollista syöttää työkaluun ja saada käyttökelpoisia tuloksia myös muualle kuin Suomen olosuhteisiin suunnitelluista kannakkeista. Usean kannaketyypin sisältävä kannakejärjestelmä vaatii laskennan laajentamista kattamaan myös muut suunnitellut kuormitustyytit sekä palkkiprofiilit, mutta tämä työ osoittaa omalla osa-alueellaan kannakkeiden suunnittelutyön vakioinnin olevan mahdollinen tavoite.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Production Engineering

SUUTARINEN, ANTTI: Duct support structure system for power plants

Master of Science Thesis, 74 pages, 2 Appendix pages

August 2014

Major: Production Engineering

Examiner: Professor Asko Riitahuhta

Keywords: duct, duct support, power plant, modulation, system

Duct supports are one of the most important design objectives in a power plant. A good support is structurally rigid but at the same time light as possible. As a construction the supporting structure also needs to be as simple as possible. The objective of this thesis is to design a new duct support solution and create a basis for a broader, standardized duct support catalogue. This thesis encompasses a new duct support design and a parameter-based calculation tool to speed up the design process.

This thesis is divided into following parts: The first part concentrates on company's current situation regarding duct supports and considers the suitability of current solutions in this thesis' theoretical subtext. This part is a general view of current practice and in it we challenge the customary design concepts. Conceptual design chapter focuses on considering alternative solutions to support-related problems and narrows the focus to most suited support design candidate. Calculation chapter concludes the research by proving that the considered alternative is suitable. It creates a basis for standardised duct support catalogue by evidencing a calculation tool that executes the needed strength calculations concerning the structure and load.

Calculations are included in calculation tool in functional form and every input sets new calculations in action. The tool uses results to propose suitable beam structures for this type of duct support. The standardization of duct supports is very important development project because standard procedures in design phase speed up the whole design process. Speeding up the process has also a direct impact on financial savings. The calculations in this thesis only concern overhead mounted, single-beam guided horizontal rectangular duct.

The research in this thesis shows that duct support standardisation is a possible goal. The calculation tool gives valid results for the design that this thesis concerns. The available beam profile selections are limited but the load input encompasses anything from basic design situations to a magnitude of an earthquake. This means valid results on a global scale.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty työnantajani Elomatic Oy:n sekä Valmet Power Oy:n yhteisestä toimeksiannosta Tampereella kesäkuun 2013 ja elokuun 2014 välisenä aikana. Molemmille yrityksille esitän kiitokset mielenkiintoisesta tutkimusaiheesta. Työn ohjajille, Tuomas Kanniaiselle sekä Jani Kujanpäälle, esitän lämpimät kiitokseni saamastani tuesta, ohjauksesta ja hyödyllisistä neuvoista koko pitkän tutkimusprosessin aikana. Kiitän myös työni tarkastajaa, professori Asko Riitahuhtaa, erinomaisista kommenteista ja kannustuksesta työn aikana.

Kiitän työn aikana erityisosaamistaan ja tietouttaan jakaneita henkilöitä, joista mainittakoon erikseen Jouni Kärkkäinen, Juha Ojanperä, Timo Parviainen sekä Juha Ahvonen. Haluan lisäksi kiittää kaikkia haastattelemiani asiantuntijoita, jotka omalla ammatitaidollaan toivat näkemyksiään esiin ja osaksi tätä diplomityötä.

Haluan kiittää ystäviäni ja opiskelutovereitani, joiden ansiosta opiskeluaikani Tampereen teknillisessä yliopistossa on ollut ikimuistoinen kokemus. Parhaimmat kiitokseni haluan osoittaa vanhemmilleni sekä tyttöystävälleni kaikesta kannustuksesta ja tuesta, jota olen tämän työn sekä koko opiskelujeni aikana saanut. Teillä kaikilla on ollut oma, korvaamaton merkityksensä siihen, että olen tässä.

Tampereella 28.7.2014

Antti Suutarinen

SISÄLLYS

Abstract	iii
Termit ja niiden määritelmät	vii
1 Johdanto	1
2 Voimalaitosympäristö	2
2.1 Kerrosleijupoltto	2
2.2 Kiertoleijupoltto	3
2.3 Voimalaitoskanavat	4
2.4 Ilma- ja savukaasukanavien kannakointi	6
2.4.1 Kannakkeen lujuusopilliset näkökohdat	7
2.4.2 Kannaketyypit Valmet Powerilla	7
3 Tutkimusmenetelmät	12
3.1 Modulointi	12
3.2 Design for Manufacture	13
3.2.1 Konseptisuunnittelun seitsemän porrasta	14
3.2.2 DFM -tekniikat	16
3.3 Lujuusopilliset vaatimukset	17
3.3.1 Valmet Powerin kanavas suunnitteluohjeen asettamat ehdot	18
3.3.2 Jännityksen ja venymän välinen yhteys	18
3.3.3 Kimmoteoria ja plastisuusteoria	19
3.4 Kannakkeen palkkirakenteiden rajatilamitoitus	19
3.4.1 Rakenteita koskevat säännöt	20
3.4.2 Taivutuskestävyys	23
3.4.3 Leikkauskestävyys	24
3.4.4 Leikkauslommahduskestävyys	24
3.4.5 Kestävyys taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutukselle	25
3.4.6 Kiepahduskestävyys	25
3.4.7 Liitosten mitoitus	29
3.4.8 Lämpötilan vaikutus	33
3.5 Ohjauspalojen hitsausmitoitus	36
3.5.1 Ripustustankojen kiinnitykset	38
4 Konseptisuunnittelu	39
4.1 Lähtökohdat	39
4.1.1 Top-down approach	40
4.1.2 Modulaarisuus konseptissa	44
4.2 DFM soveltaminen ja modulaarinen perustelu suunnittelussa	45
4.3 Konseptikandidaatin valinta	47
4.3.1 Konseptista järjestelmäksi	47
4.3.2 Sopivimman konseptikandidaatin valinta	49
5 Tulokset ja tulosten tarkastelu	53
5.1 Laskentatyökalun toiminta	53

5.1.1	Kiepahdustarkastelun verifiointi.....	55
5.1.2	Jäykistekehä ja ohjauspalkin ohjauspalat	58
5.2	Lähtötiedot	61
5.2.1	Oletustilanteen laskenta	61
5.2.2	Eriyistilanteen laskenta.....	63
5.3	Tulokset.....	65
5.3.1	Oletustilanteen tulokset.....	65
5.3.2	Eriyistilanteen tulokset	67
6	Yhteenveto ja johtopäätökset	70
	Lähteet.....	72
	Liite 1: Laskentatyökalun ohjekuva	75
	Liite 2: Laskentatyökalun etusivu	76

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Kanava	Ilmatiivis väylä, joka kuljettaa tai poistaa halutun kaasuvirtauksen tietyssä tilassa paikasta toiseen.
Kannake	Kannattelee ja suojaa kanavia sekä niihin liittyviä laitteita ja varusteita. Lisäksi kannakkeet ohjaavat kanavan liikettä sekä siihen kohdistuvia voimia ympäröiviin rakenteisiin.
Primäärikannake	Putkeen tai joissain tapauksissa kanavaan suorassa yhteydessä oleva, ensisijainen tukiosa jonka avulla kannake kiinnittyy sekundäärikannakkeeseen. Termi käytössä erityisesti puhuttaessa putkistoista.
Sekundäärikannake	Tuki, johon primäärikannakkeet liittyvät. Sekundäärikannake on ripustuksen rakenteellinen tukiosa, ja se kiinnitetään rakennuksen runkoon tai lattiaan.
Ohjaava kannake	Kannaketyyppi, joka sallii liikkeen halutussa suunnassa ja ohjaa kanavaa.
Liukukannake	Kannaketyyppi, joka ohjaa kanavaa liukumalla toisen pinnan päällä lämpöliikkeen vaikutuksesta.
Riippuva kannake	Kannaketyyppi, jossa kanavan kannakointi toteutetaan riippuvana rakenteena tukipalkilla ja tukitangoilla.
Jousikannake	Pystysuuntaisten siirtymien hallintaan suunniteltu kannake, joka sallii kanavan vertikaalisen liikkeen tietyissä rajoissa.
Vakiovoimakannake	Kannaketyyppi, joka soveltuu suurten vertikaalisten liikkeiden hallintaan. Käytetään usein tapauksissa, jossa jousikannakkeen liikealue tai muut raja-arvot ylittyvät.
Rinnakkaissuunnittelu	Concurrent Engineering. Työskentelytapa, jossa tehtäviä suoritetaan rinnakkain ja tällöin vähennetään tuotteen markkinoillepääsyyn kuluva aikaa. Tehtäviä voivat olla esimerkiksi suunnittelu ja valmistus.
DFM	Design for manufacture. Valmistettavuuden huomioon otta-va tuotekehityksen lähestymistapa, jossa uusia konsepteja pohditaan valmistuksen näkökulmasta jo varhaisessa vaiheessa.
Modulointi	Kehityskohteen hajottaminen erilaisiin toiminnallisiin osiin, joita yhdistelemällä saadaan mahdollisimman laaja tuotevalikoima.
Top-down approach	Kehityskohteen tutkimisen lähestymistapa, jossa ensin muodostetaan laajempi käsitys yhtäläisistä kohteista, ja tämän jälkeen tiivistetään näkemystä keskittymällä tarkemmin yhteen yksityiskohtaan olemassa olevan tiedon perusteella.

Hooken laki	Jännitys-venymäyhteyden materiaaliyhtälön yksinkertaisin muoto, joka kuvaa materiaalin jäykkyyttä tarkasteltavassa pisteessä ja olettaa materiaalin olevan lineaarisesti kimmoisaa.
Kimmoteoria	Mitoitustapa, joka olettaa jännitysten ja siirtymien välillä olevan lineaarinen riippuvuus Hooken lain mukaan.
Plastisuusteoria	Mitoitustapa, jossa otetaan huomioon materiaalin epälinearisuuden vaikutukset laskettaessa rakenteen voimasuureita.
Eurokoodi	Eurokoodit ovat kantavien rakenteiden suunnittelustandardeja, jotka on laadittu Euroopan komission toimeksiannosta.
a, a_b	Hitsisauman a-mitta
A	Poikkileikkauksen pinta-ala
A_v	Leikkauspinta-ala
A_{vc}	Teräsrakennepalkin leikkauspinta-ala liitoksen mitoituksessa
b	Palkkiprofiilin kokonaisleveys
$b_{eff,b,fc}$	Profiilin tehollinen leveys laipan taivutustarkastelussa
$b_{eff,c,wc}$	Palkin puristetun uuman tehollinen leveys
$b_{eff,t,wc}$	Palkkiprofiilin tehollinen leveys teräsrakennepalkin uuman poikittaisessa vedossa
c	Uuman korkeus poikkileikkausluokituksessa
C_1	Taivutusmomenttipinnan muodosta ja tehollisen pituuden kiertymistekijästä riippuva ensimmäinen tekijä kiepahduksessa
C_2	Taivutusmomenttipinnan muodosta ja tehollisen pituuden kiertymistekijästä riippuva toinen tekijä kiepahduksessa
C_3	Taivutusmomenttipinnan muodosta ja tehollisen pituuden kiertymistekijästä riippuva kolmas tekijä kiepahduksessa
d_{wc}	Palkkiprofiilin muodosta riippuva halkaisija liitosten mitoituksessa
E	Kimmokerroin
$E_{a,\theta}$	Kimmokerroin korkeassa lämpötilassa palomitoituksessa
E_d	Kuorman aiheuttaman voiman tai momentin mitoitusarvo
$F_{c,fb,Rd}$	Palkin laipan ja uuman puristuskestävyyden mitoitusarvo
$F_{c,wc,Rd}$	Jäykistämättömän palkin uuman kestävyyden mitoitusarvo poikittaisessa puristuksessa
$F_{fc,Rd}$	Jäykistämättömän palkin laipan kestävyyden mitoitusarvo poikittaisessa taivutuksessa
F_{Ed}	Kanavan kylkeen kohdistuvan voiman mitoitusarvo
F_{Rd}	Kuormitusvoiman mitoitusarvo liitosten mitoituksessa

$F_{t,wc,Rd}$	Jäykistämättömän palkin uuman kestävyysmitoitussarvo poikittaisessa vedossa
$F_{w,Ed}$	Hitsin pituusyksikköä kohti vaikuttavien kuormavoimien mitoitussarvoresultantti hitsausmitoituksessa
$F_{w,Ed1}$	Hitsissä vaikuttavien voimien resultantin ensimmäinen mitoitussarvo hitsin yksikköpituutta kohden
$F_{w,Ed2}$	Momenttitasapainosta johtuva viivakuorma ohjauslevyn hitsisaumassa
$F_{w,Ed3}$	Lämpöliikkeestä aiheutuva viivakuorma hitsissä
$F_{w,Rd}$	Hitsin kestävyysmitoitussarvo pituusyksikköä kohti hitsausmitoituksessa
$f_{p,\theta}$	Suhteellisuusraja palomitoituksessa
f_u	Vetomurtolujuus
f_y	Myötölujuus
$f_{y,f}$	I- tai H -profiilin laipan myötöraja
$f_{y,fb}$	Palkkiprofiilin myötöraja hitsauskiinnityksessä
$f_{y,p}$	I- tai H -profiilin hitsatun levyn myötöraja
$f_{y,wc}$	Myötölujuus teräsrakennepalkin liitoskohdan uuman leikkauksen mitoituksessa
$f_{y,\theta}$	Tehollinen myötöraja palomitoituksessa
$f_{vw,d}$	Hitsin leikkauslujuuden mitoitussarvo
G	Liukukerroin
h	Liittyvän palkin korkeus liitosten mitoituksessa
h_c	Palkin uuman korkeus
h_w	Uuman korkeus leikkauslommahdustarkastelussa
I_z	Neliömomentti heikomman akselin suhteen kiepahduksessa
I_t	Vääntöneliömomentti kiepahduksessa
I_ω	Käyristymisjäyhyys kiepahduksessa
k	Tehollisen pituuden kiertymistekijä kiepahduksessa
k	Laipan paksuuden ja myötörajan suhdeluku liitosten mitoituksessa
k_ω	Tehollisen pituuden käyristymistekijä kiepahduksessa
k_{wc}	Kestävyyden mitoitussarvon pienennystekijä pituussuuntaisen jännityksen vaikutukselle palkin puristetussa uumassa
L	Sauvan pituus tukipisteiden välillä kiepahduksessa
M_{Ed}	Taivutusmomentin mitoitussarvo
M_{cr}	Kimboteorian mukainen kriittinen momentti kiepahduksessa
$M_{c,Rd}$	Taivutuskestävyyden mitoitussarvo
$M_{b,Rd}$	Kiepahdukskestävyyden mitoitussarvo

$M_{el,Rd}$	Poikkileikkauksen kimmoteorian mukainen taivutuskestävyys
$M_{j,Ed}$	Teräsrakenneliitoksen taivutuskestävyyden mitoitusarvo
N_y	Momenttitasapainosta laskettu tukivoima ohjauslevyn alapinnassa
r, r_c	Palkkiprofiilin nurkan pyöristyssäde
R_d	Rakenteen kestävyysmitoitussarvo
s	Palkkiprofiilin muodosta riippuva jännitysjakautumisen pituusmitta liitosten mitoituksessa
t	Uuman paksuus poikkileikkausluokituksessa
t_f	Teräsrakennepalkkiprofiilin laipan paksuus
t_{fb}	Palkin laipan paksuus
t_{fc}	Palkin laipan paksuus
t_p	Palkkiprofiilin laipan paksuus
t_w	Palkkiprofiilin uuman paksuus leikkauslommahdustarkastelussa
t_{wc}	Teräsrakennepalkin uuman paksuus liitoksen mitoituksessa
V_{Ed}	Leikkausvoiman mitoitusarvo
$V_{c,Rd}$	Leikkauskestävyyden mitoitusarvo
$V_{pl,Rd}$	Plastisuusteorian mukainen leikkauskestävyys
$V_{wp,Rd}$	Palkin uuman leikkauskestävyyden mitoitusarvo hitsausliitoksessa
$W_{eff,min}$	Tehollisen taivutusvastuksen pienin arvo
$W_{eff,y}$	Tehollisen taivutusvastuksen pienin arvo kiepahduskestävyyden laskennassa
$W_{el,min}$	Kimmoteorian mukaisen taivutusvastuksen minimiarvo
$W_{el,y}$	Kimmoteorian mukaisen taivutusvastuksen minimiarvo kiepahduskestävyyden laskennassa
W_{pl}	Poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen taivutusvastus
$W_{pl,y}$	Poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen taivutusvastus kiepahduskestävyyden laskennassa
W_y	Poikkileikkausluokasta riippuva taivutusvastus kiepahduskestävyyden laskennassa
z	Palkki-palkki –liitoksessa vaikuttavan voimaparin momenttivarsi
z_a	Kuorman vaikutuspisteen koordinaatti kiepahduksessa
z_g	Kuorman vaikutuspisteen ja vääntökeskiön välimatka kiepahduksessa
z_j	Vääntökeskiön ja profiilin painopisteen huomioon ottava tekijä kiepahduksessa

z_s	Vääntökeskiön koordinaatti kiepahduksessa
α_{LT}	Epätarkkuustekijä kiepahduksessa
β	Leikkauksen rasittaman uuman vaikutuksen muunnosparametri liitoksessa
β_w	Pienahitsin teräslajista riippuva korrelaatiokerroin
γ_M	Murtorajatilán kestävyyden osavarmuusluku
ε	Myötölujuudesta riippuva osavarmuustekijä
$\varepsilon_{p,\theta}$	Suhteellisuusrajaa vastaava venymä palomitoituksessa
$\varepsilon_{y,\theta}$	Myötövenymä palomitoituksessa
$\varepsilon_{t,\theta}$	Myötörajaa vastaavan venymän yläraja palomitoituksessa
$\varepsilon_{u,\theta}$	Murtovenymä palomitoituksessa
η	Muokkauslujittumisen huomioonottava tekijä leikkauslommahdustarkastelussa
κ_τ	Leikkauslommahduskerroin
$\bar{\lambda}_{LT}$	Muunneltu hoikkuus kiepahdukselle
$\bar{\lambda}_p$	Levyn hoikkuus liitoksen tarkastelussa
ν	Poissonin luku, suppeumakerroin
ρ	Levyn lommahduksen huomioon ottava pienennystekijä uuman poikittaisessa puristuksessa
σ	Jännitys
σ_E	Jännityksen kimmoraja
σ_p	Jännityksen suhteellisuusraja
ϕ_{Ed}	Liitettävien sauvojen välinen kiertymä liitosten mitoituksessa
Φ_{LT}	Kiepahduskäyrän epätarkkuustekijän ja sauvan muunnellun hoikkuuden välinen tekijä kiepahduksessa
χ_{LT}	Kiepahduskestävyyden pienennystekijä
ω	Palkin uumaan kohdistuvan leikkauksen yhteisvaikutukset huomioon ottava pienennystekijä

1 JOHDANTO

Valmet Power on voimalaitoksiin sekä lämpölaitoksiin erikoistunut energiateollisuuden teknologia- ja palvelutoimittaja. Yrityksen keskeisin tehtävä on toimittaa asiakkailleen paikallisia ja uusiutuvia biopolttoaineita joustavasti hyödyntäviä laitoskokonaisuuksia. Tämä työ keskittyy laitosten ilma- ja savukaasukanaviin ja erityisesti niiden kannakointiin eli ankkurointiin kanavaa ympäröiviin teräsrakenteisiin. Kanavalinjat liittyvät oleellisesti voimalaitoksen toimintaan. Ilmakanavat tuovat polttoprosessin tarvitseman ilman tulipesään ja savukaasukanavat poistavat palamisessa syntyneet savukaasut esilämmittimien kautta suodattimelle ja sieltä savupiippuun.

Suurin puute kannakoinnin nykytilanteessa on ohjeistuksessa sekä standardien ja vakiintuneiden toimintatapojen poissaolevuudessa. Verrattaessa tilannetta putkistorakenteisiin, ero tulee selvemmin esiin. Putkistokannakkeista on olemassa Suomen Standardoimisliitto SFS:n suositukset, mutta kanavat muodostavat monisyisemmän kokonaisuuden, jossa vaikeutena on yksinkertaistaminen ja selkeiden toimintaohjeiden luominen. Standardoituja ohjeita ei tältä osin siis ole.

Tutkimuksen tavoitteena on tutkia ja yhtenäistää voimalaitoskanavissa käytettyjä kannakointiratkaisuja. Tämä työ antaa suuntaa kanavakannakkeiden rakennevariaatioiden vähentämiselle samalla luoden järjestelmällisyyttä käytettyihin ratkaisuihin. Yhtenäisen ohjeistuksen luominen tehostaa suunnittelijan työtä sekä vaikuttaa kustannustehokkuuteen. Tavoitteena on yhtenäistämisen lisäksi myös kannakkeiden vaatimusten mukaisuus. Tämä on laaja käsite, joka kattaa monen eri näkökannan, käyttökohteen ja osapuolen vaatimusten täyttymisen. Vaatimuksia asettavat esimerkiksi lämpötila, tärinä, kanavan massa, kanavan koko, kanavan muoto, eristettävyys, tuhakuormat, kitkavoimat, kuljetettavuus sekä laitoksen layout ja tilavaraukset. Näin monitahoinen tarkastelukokonaisuus tekee suunnittelutyöstä hidasta ja usein kannakkeita joudutaan laskemaan ja mallintamaan tilaustyönä.

Tässä työssä luodaan tietyn yksittäisen, muotoilultaan uudenlaisen kanavakannakkeen lujuuslaskentatyökalu, jonka periaatteita voidaan laajentaa kattamaan useampi kannake. Laskentatyökalu mahdollistaa kannaketyypin käytön erikokoisissa kanavissa ja erilaisissa kuormitustilanteissa. Tarkoituksena on tuottaa suunnittelutyöhön vakioituja toimintatapoja, jotka nopeuttavat koko prosessia, ja jossa on aiemmin ollut hyvin erilaisia toimintamalleja riippuen työn suorittavasta henkilöstä. Tässä työssä tehdään myös katsaus kannakkeiden rakenteelliseen toimintaan vakioinnin ja modulaarisuuden näkökulmasta. Kaikki laskentatyökalun materiaali ei mahdu täysimääräisesti tähän työhön, vaan se raportoidaan eri kuormitustilanteiden laskentaesimerkein.

2 VOIMALAITOSYMPÄRISTÖ

Voimalaitoksella tarkoitetaan teollisuusmittakaavan sähkön- ja lämmöntuotantolaitosta. Tässä työssä keskitytään voimalaitoksen kanavistoihin ja erityisesti niiden tukemiseen laitoksen rakenteisiin. Työ ottaa kantaa kanaviston kannakkeisiin, tehtäviin ja rakenteellisiin ratkaisuihin. Tarkastelukohteena on Valmet Powerin kattilalaitosratkaisuihin käytetyt kannakkeet, ja niiden parantaminen ja yhtenäistäminen yrityksen sisäisessä kanavistosuunnittelun yleisohjeessa.

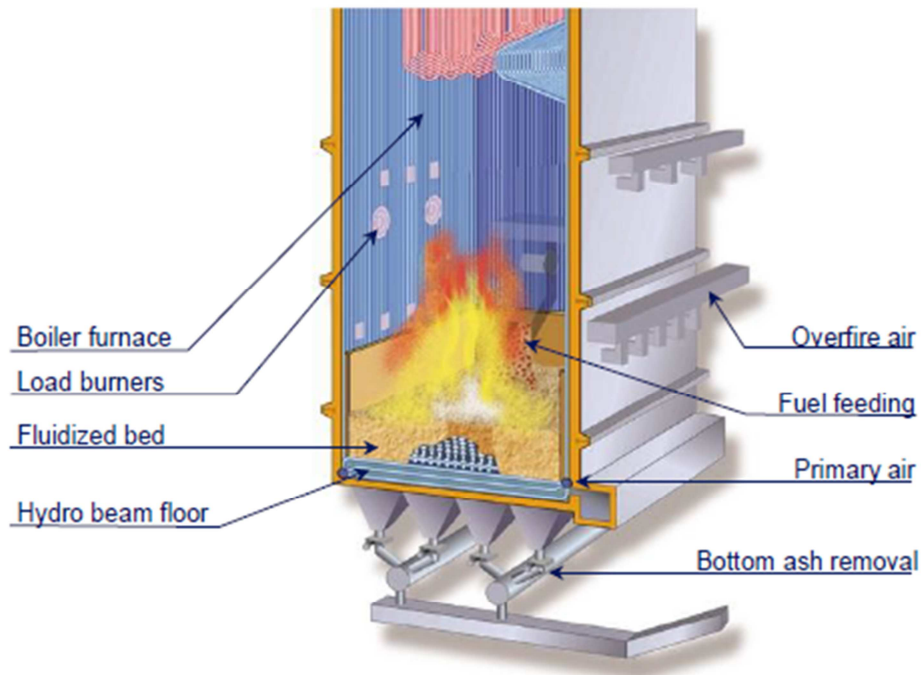
Toimintaympäristössä energiaa tuottavan kattilalaitoksen höyrykattilaan syötetään polttoaine sekä tarvittava määrä palamisilmaa. Kattilassa polttoaine reagoi palamisilmassa olevan hapen kanssa ja tällöin polttoaineeseen sitoutunut kemiallinen energia muuttuu savukaasuihin sitoutuneeksi lämpöenergiaksi. Tämä lämpö pyritään hyödyntämään mahdollisimman tarkkaan jäähdyttämällä savukaasuja erilaisissa lämmönvaihtimissa ennen kuin savukaasut johdetaan puhdistuksen ja savupiipun kautta ympäristöön. (Huhtinen et al. 2000, s. 7)

Valmet Powerin kattilalaitokset perustuvat ympäristöystävälliseen leijupolttoon, jossa leijupeti työntää kiinteää polttoainetta ylöspäin tulipesässä palamisprosessin aikana. Tuloksena on turbulentti sekoitus kaasuja ja kiinteää ainetta, jolloin aineen- ja lämmön siirto on tehokasta. Leijupeti tuottaa tehokkaan palamisen ja tehostaa prosessin kemiallisia reaktioita. (Maa- ja metsätalousministeriö 2012, Metso pulp and paper 2013a)

Polttoaineena voidaan käyttää biomassaa yhdessä tai erikseen muiden polttoaineiden kanssa. Leijupoltteknologiassa polttoaineita poltetaan yhdessä lisäaineiden, hiekan, tuhkan ja muiden kuumapetimateriaalien kanssa. Teknologia ei myöskään vaadi juuriakaan polttoaineen esikäsittelyä. Leijupoltto voidaan toteuttaa joko kerros- tai kierto-leijuna. Valmet Powerilla on näihin tekniikoihin perustuen kaksi tuotetta: Kerrosleijupolttoon perustuva HYBEX –kattila sekä Kiertoleijupolttoon perustuva CYMIC –kattila. (Metso pulp and paper 2013a)

2.1 Kerrosleijupoltto

Kerrosleijupoltossa (Bubbling Fluidized Bed) on kattilan alaosassa metrin syvä kupliva kerros hiekkaa, jota kutsutaan hiekkapediksi. Palamisalue säilyttää kaiken polttoaineesta vapautuvat lämmön, joten tekniikka soveltuu erinomaisesti biomassan ja kierrätysmateriaalin polttoon. Kuuma hiekka kuivattaa ja haihduttaa polttoainepartikkeleita, jotka sytytetään pedin päällä sekundääri-ilmalla suurempien partikkeleiden syttyessä hiekkapedissä. (Metso pulp and paper 2013b) HYBEX –kattilan toimintaperiaate on esitetty kuvassa 1.

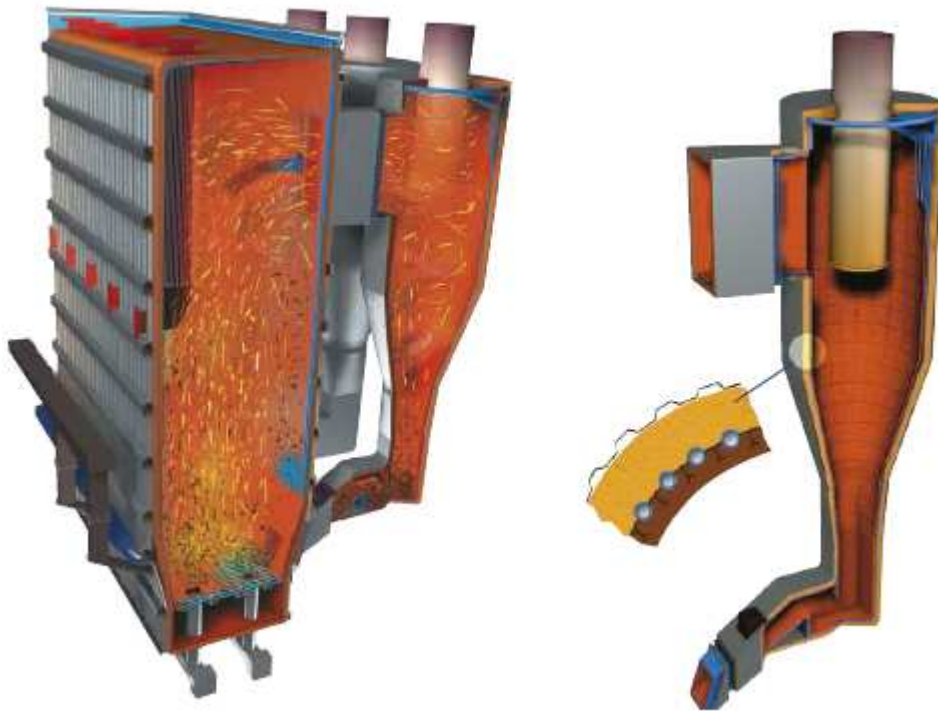


Kuva 1. HYBEX –kerrosleijukattila. (Metso pulp and paper 2013b)

Kerrosleijukattilat soveltuvat matalalämpöisille ja kosteille polttoaineille. Etuina on esimerkiksi laaja polttoainejoustavuus, luotettavuus, korkea hyötysuhde ja matalat päästöt. Pohjaratkaisu sallii epäpuhtauksia polttoaineissa, joka osaltaan mahdollistaa edullisten polttoaineiden käytön. (Metso pulp and paper 2013b)

2.2 Kiertoleijupoltto

Kiertopetikatiloissa käytetään suurempia leijutusnopeuksia ja hienojakoisempaa petimateriaalia kuin kerrosleijukattiloissa. Menetelmälle on ominaista voimakas pyörteisyys ja hiukkasten hyvä sekoittuminen. (Huhtinen et al. 2000, s. 159) Kiertoleijupoltossa petimateriaali virtaa savukaasujen mukana tulipesän lävitse sykloniin. Partikkelit erotellaan syklonikartiossa, jossa hiekka ja raskaat petimateriaalit palautetaan pesän alaosaan savukaasujen jatkaessa eteenpäin. Syklonin jälkeen savukaasukanavassa sijaitsevat pääosa tulistimista sekä veden ja ilman esilämmittimet. Sykloni syöttää kiinteää materiaalia jatkuvasti takaisin tulipesään ja se on merkittävin tekniikoiden erottava tekijä kerrosleijupolttoon verrattuna. (Metso pulp and paper 2013c) CYMIC –kiertoleijukattila on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. CYMIC –kiertoleijukattila ja sykloni. (Metso pulp and paper 2013c)

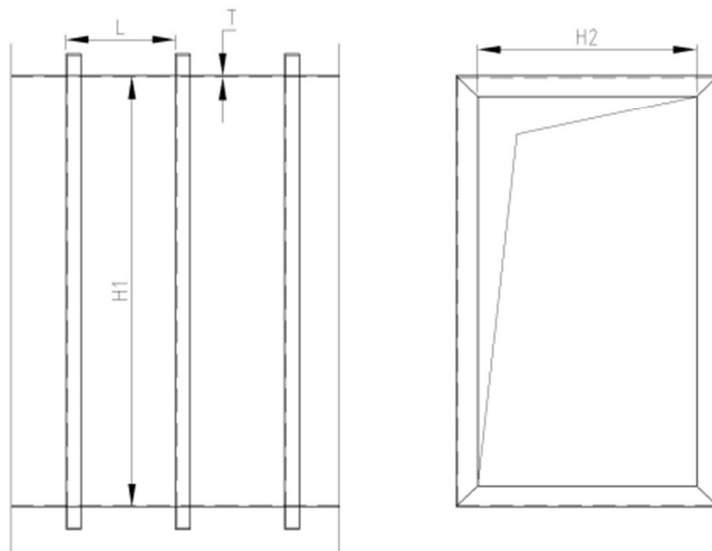
CYMIC –kiertoleijukattila on erittäin joustava käytettävien polttoaineiden suhteen. Polttoaineena voidaan käyttää sataprosenttisesti fossiilisia polttoaineita, sataprosenttisesti biomassaa tai mitä tahansa näiden sekoitussuhdetta. Yhteispoltto tuo mukanaan monia etuja päästöjen, syttymisherkkyiden ja pedin korroosiosiedon kannalta. Syklonin seinämät on tehty jäähdytetystä membraanimateriaalista, joka pienentää seinämäpinnan kokoa osallistuen samalla lämmönsiirtoon ja pienentäen lämmön karkaamista. (Metso pulp and paper 2013c)

2.3 Voimalaitoskanavat

Kanava (engl. Duct) määritellään ilmatiiviiksi väyläksi, jonka tehtävänä on kuljettaa haluttu kaasuvirtaus tietyssä tilassa paikasta toiseen. Kanavissa kulkee yleisesti voimalaitosympäristössä joko ilmaa tai savukaasuja ja ne liittyvät oleellisesti voimalaitoksen toimintaan. Ilmakanavat tuovat polttoprosessin tarvitseman ilman tulipesään ja savukaasukanavat poistavat palamisessa syntyneet savukaasut esilämmittimien kautta suodattimelle ja sieltä savupiippuun.

Kanavan sisällä vallitsee yli- tai alipaine ja sen rakenteellinen muoto on yleensä leikkauskuvana suorakaide tai pyöreä. (American Society of Civil Engineers 1995 s. 7) Kanavat koostuvat levykentistä ja rakenteen valmistus tapahtuu useimmiten hitsaamalla kanava muotoonsa teräslevyistä. Ulkopintaan hitsataan tämän jälkeen jäykistekehiä esimerkiksi latta- tai kulmatangoista, jotta levykentän jännitykset ja siirtymät saadaan

pysymään riittävän pieninä. (Haverinen 1987, s. 8-12, Toropainen 2011, s. 16) Kuvassa 3 on esitettyä suorakaiteen muotoisen kanavan periaatekuva.



Kuva 3. Suoran kanavan dimensiot ja jäykistekehät. (Metso Power Oy 2013a, s. 3)

Kuvasta nähdään kanavan leikkauskuva jäykisteineen sekä sen laskentamittoja symbolien. Tärkeitä suunnittelumuuttujia ovat kanavan koon lisäksi esimerkiksi jäykisteväli sekä levyn paksuus. Kanavien lujuusteknisessä mitoituksessa on suunnittelijan lisäksi otettava huomioon esimerkiksi lämpötila, materiaali, kanavageometria, paine ja jäykisteet. Lämpötilaa huomioonottaessa kanavat ovat usein itsenäisiä rakenteita, jotka liukuvat tukien tai riippuvat tankosysteemin varassa. (American Society of Civil Engineers 1995 s. 7) Lisäksi mitoituksessa on aina käyttökohteesta riippuvia, tapauskohtaisia muuttujia kuten savukaasukanaviin kerääntyvä tuhka tai tuuli-, lumi- ja maanjäristyskuormat. Kanavien oma paino on merkittävä muuttuja kuljetuksia suunniteltaessa. (Toropainen 2011, s. 16-17)

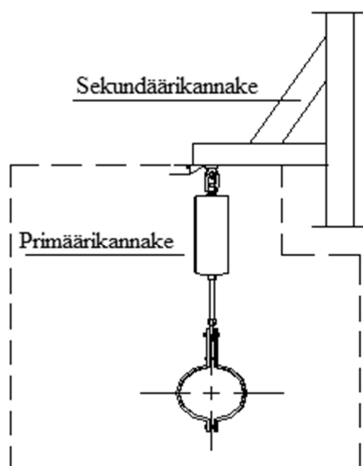
Kanavien jäykisteiden päällä on yleisesti oltava eristystä vähintään 40 millimetriä, usein myös enemmän. Tämä on otettava huomioon kanavien tilavarauksessa varsinkin, jos eristyksen paksuus on pienempi kuin kanavajäykisteen korkeus. Laitoksen layoutia suunnitellessa on eristepaksuus otettava aina huomioon. Kanaville se määräytyy useimmiten standardin SFS 3977 mukaisesti. (SFS 5744 2002, s. 27)

Kanavilla voidaan erottaa kaksi tuentaan vaikuttavaa pääryhmää, vaaka- ja pystysuuntaiset kanavat. Lisäksi tuentaan vaikuttaa kanavan muoto, joka on yleisesti joko kantikas, eli suorakaidekanava tai pyöreä. Valmetin konstruktiosuunnitteluohjeessa (Metso Power Oy 2009b, s. 3) on määritelty suosittavan ensisijaisesti pyöreitä kanavia, sillä jäykistetarve on niiden osalta vähäisempi kuin suorakaidekanavalle. Tämä johtaa kevyempiin kanaviin, ja koska kanavien valmistus perustuu kilohintaan, tulevat pyöreät kanavat halvemmiksi. Tässä asiassa kuitenkin layout määrittää aina lopullisen kanavamudon. Tiedetyt liitännät esimerkiksi erilaisiin laitteisiin rajoittavat pyöreän kanavamudon käyttöä. (Metso Power Oy 2009b, s. 3-4)

2.4 Ilma- ja savukaasukanavien kannakointi

Kannakoinnin ensisijainen tehtävä on kannattaa ja suojata kanavia sekä niihin liittyviä laitteita ja varusteita. Lisäksi kannakkeet ohjaavat kanavan liikettä sekä siihen kohdistuvia voimia ympäröiviin rakenteisiin. Kannakesuunnittelua on kanavien osalta dokumentoitu yleisesti melko vähän. Putkistosuunnittelun puolella on olemassa standardit kannakeratkaisuille sekä kannakeväleille, mutta nämä eivät suoraan peilaudu kanavapuolelle käyttökohteiden eroista johtuen. Esimerkiksi yleistä standardiohjetta kannakkeiden rakenteelle tai sijoitusväleille kanavalinjassa ei ole. Kannakesuunnittelu on merkittävä osa onnistunutta kanavasuunnittelua, sillä kannakointi vaikuttaa esimerkiksi kanavan lämpökuormien kestoon, huollettavuuteen ja asennettavuuteen.

Yleisesti putkistojen sekä jossain määrin kanavienkin kannakoinnissa puhutaan primääri- ja sekundäärikannakkeista. Primäärikannakkeet ovat suoraan putkeen tai kanaan liitettäviä ensisijaisia tukiosia, yleisimpinä esimerkkeinä ovat liukukenkä tai jousityyppinen primäärikannake. Sekundäärikannakkeeksi kutsutaan esimerkiksi teräspalkeista rakennettua tukea, johon primäärikannakkeet liittyvät. Sekundäärikannake on ripustuksen rakenteellinen tukiosa, ja se kiinnitetään rakennuksen runkoon tai lattiaan. (Pere 2012, s. 14-27) Kannakkeiden jakoa putkistoille on havainnollistettu kuvassa 4.



Kuva 4. Putkistokannakkeiden jako primääri- ja sekundäärikannakkeisiin.

Termien primääri ja sekundääri käytössä tosin on huomattava ero putkistojen ja kanavistojen välillä. Esimerkiksi tankoelementit usein mielletään putkistopuolella primääriosiksi, kun taas kanavistojen osalta niiden rooli kannakkeen rakenteessa voidaan katsoa olevan sekundäärinen. Eri osaelementtien rajapinnat ovat usein suunnittelijan näkemyksiä, ja siksi nykytilanne onkin jaottelultaan haastava kanavapuolella. Nimikkeiden käyttöä kanavakannakkeissa tuleekin pohtia eri tavalla kannakointiperiaatteiden eroavaisuuksien takia.

Kanavapuolella vakiintunut nimeämiskäytäntö on eritellä kannakkeen osat hankintaperusteisesti. Kaikki kannakkeen osat, jotka ovat saatavilla katalogeista suoraan, ni-

metään kannakekomponenteiksi. Sen sijaan kaikki palkki- ja levytavara, mitä ei löydy suoraan katalogeista, nimetään kannaketeräksiksi.

Kannakesuunnittelun lähestymistapana on yleisesti kanavasta riippuen joko tapaus- tai positiokohtainen kannakkeiden käyttö tai tyyppikannakkeiden käyttö. Suunnittelija tekee siis usein tilanteesta riippuen oman valintansa kannakkeen muodosta ja tyypistä, joten kannakointi on hyvin suunnittelijariippuvainen ala. Tyyppikannakkeita käytettäessä kanava tuetaan modulaarisilla ja toistuvilla vakioratkaisuilla, jotka ovat tilausosia. Näitä ovat esimerkiksi jousikannakkeet ja erilaiset vakiovoimakannakkeet. Savukanavien kannatusten suunnittelussa on erityistä huomiota kiinnitettävä kylmäsiltojen katkaisun sisäpuolisten pintojen kondensoitumisen estämiseksi. Kannatukset on suunniteltava siis siten, ettei vesi tai pakkanen pääse eristyksen sisään. (Metso Power Oy 2009a, s. 1)

2.4.1 Kannakkeen lujuusopilliset näkökohdat

Kannakoinnissa on eräitä kanaville tyypillisiä huomioon otettavia näkökohtia. Kaikki korkeampiin lämpötiloihin altistettut kanavat lämpölaajenevat. Kanava täytyy olla kiinnitetty rakenteisiin yhdestä niin sanotusta ankkuripisteestä (engl. fixed point), siten että se voi laajeta esteettömästi pisteestä katsoen joka suuntaan. Ankkuripisteen ei tarvitse olla kanavan painopisteessä rakenteellisena tukena vaan sen tehtävä on minimoida laajentumisliikkeestä johtuvaa leikkausjännitystä. (American Society of Civil Engineers 1995 s. 19)

Ohjaus on kannakoinnissa hyvin tärkeää. Ohjaukseksi kutsutaan kanavan ja sen kannakointirakenteen yhdistävää komponenttia, jolla kuormat ohjataan kanavasta kannakointirakenteisiin. Kuormat voivat olla esimerkiksi tuulikuormaa, seismistä kuormaa, laajenemisvoimia, epätasapainoista painetta tai lämpölaajenemisen aiheuttamia kitkavoimia. Kanavan ja kannakerakenteen välille muodostuu lämpöliikkeessä käytännössä aina kitkavoimia, joita pyritään minimoimaan sopivin kannakkein. Kannaketta, joka sallii lämpöliikkeen, kutsutaan liukukannakkeeksi tai ohjaavaksi kannakkeeksi, sillä sitä ei ole ankkuroitu kiinni tukirakenteisiin esimerkiksi hitsaamalla.

Liukukannake on alta kannakoitu tapaus, joka lepää nimensä mukaisesti niin sanottujen liukupalojen varassa. Ne sallivat kanavan liikkeen ja suuntaavat voimia pois päin ankkuripisteestä. (American Society of Civil Engineers 1995 s. 20) Yläpuolelta kannakoidussa riippuvassa kannakkeessa ohjaus toteutetaan erilaisin teräslevyjin, jonka välissä ohjaava kannake-elementti liikkuu.

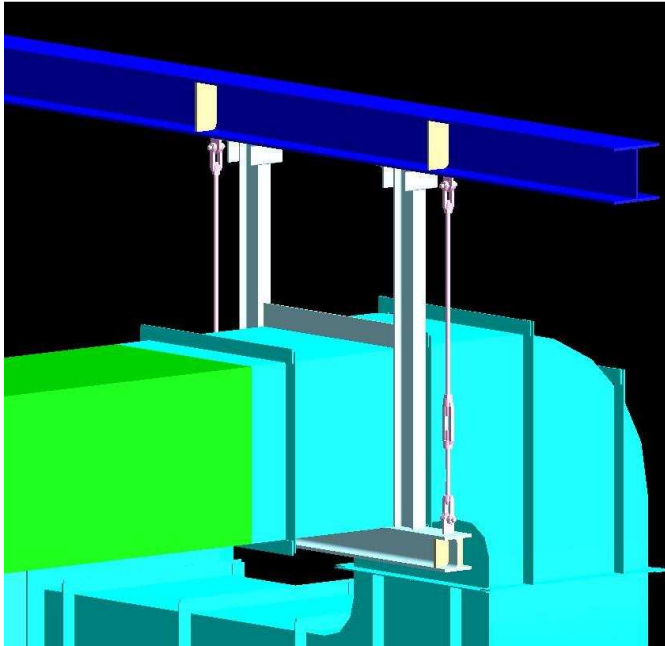
2.4.2 Kannaketyypit Valmet Powerilla

Tämä alaotsikko käsittelee yleisellä tasolla Valmet Powerin käyttämiä kannakeratkaisuja ja niiden periaatteita. Kappaleen tarkoitus on luoda yleiskuvaa nykytilanteesta, jota tämän työn ja laskentatyökalun pohjustamana on tarkoitus yhtenäistää.

Yrityksen käyttämät kannaketyypit voidaan jaotella kanavien suuntien, ulkomittojen ja käyttötarkoituksen mukaan erilaisiin pääryhmiin. Erisuuntaisilla kanavilla on tietyn-

laiset vaatimukset kannakkeiden osalta, jotka suunnittelijan on otettava huomioon. Laitoksen layout tosin määrittää pitkälti tuennan konfiguraation, joten suunnittelutyökin on perinteisesti ollut hyvin tilanteen mukaista.

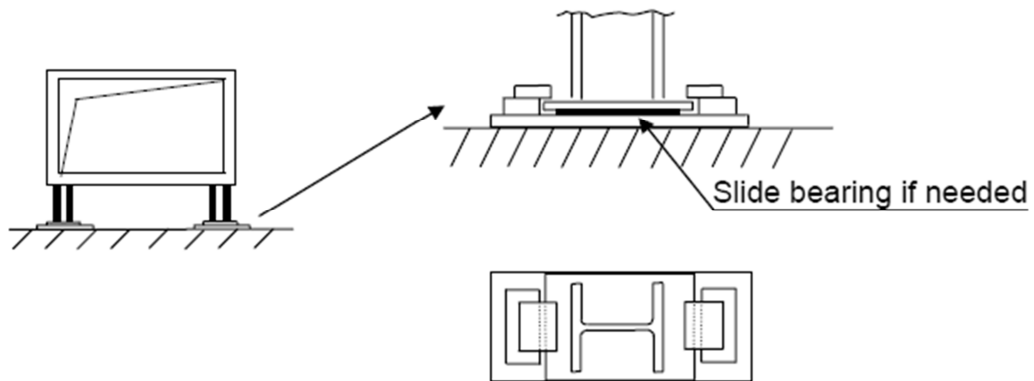
Tarkastellessani työkuvia ja 3D-malleja Valmet Powerin aiemmista projekteista selkeytyi tietynlainen suunnittelijan pääsääntö hyvälle ratkaisulle. Kuorma on saatava jaettava mahdollisimman hyvin, mahdollisimman vähällä materiaalilla ja pienellä kanavan massan kasvulla. Kuvassa 5 on esitetty Valmet Powerin suorakaiteen muotoinen sekundaari-ilmakanava kannakkeineen.



Kuva 5. Valmet Powerin kanavarakenne sekä kiinnitys teräsrakenteisiin. (*Plant Design Management System*)

Kuvasta nähdään kanava jäykisteineen sekä ennen kanavamutkaa sijoitettu kannake. Kuvan kanava riippuu kannakepalkin päällä, jota ympäröi porttimainen rakennekehikko. Kanavan lämpöliike on sallittu pitkittäissuuntaisesti L-raudoin, eikä porttipalkkeja ole hitsattu kiinni kuvassa sinisellä värillä korostettuun tasopalkkiin. Vaaleanpunaisella värillä kuvassa korostetut tangot ottavat vastaan kanavan painon ja pystysuuntaiset palkit rajoittavat liikesuunnan samalla jäykistäen kanavaa. Tämä on laitasmalleissa melko yleinen ratkaisu vaakasuuntaisille kanaville, joskaan ei millään muotoa vakioitu toimintatapa.

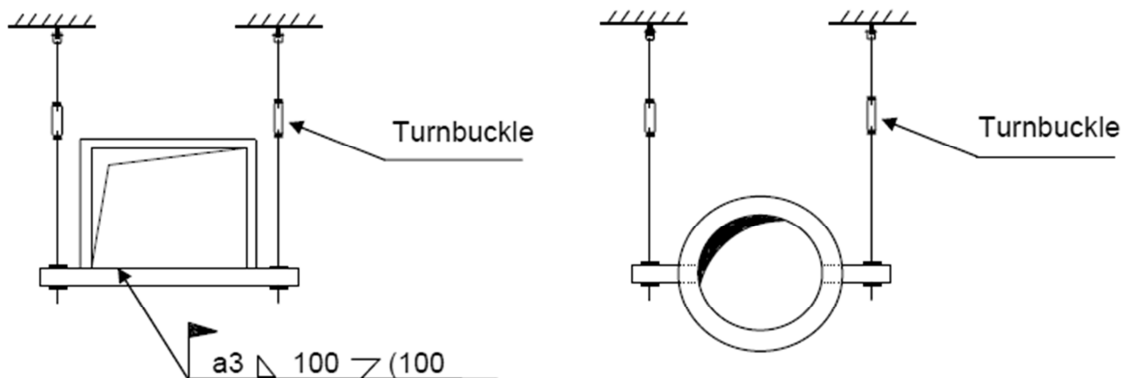
Kanavia voidaan kannakoida alapuolelta tukemalla tai edellä mainittua ratkaisua mukailten riiputtamalla. Valmetin tuentaohje alta tuetulle vaakakanavalle ilmoittaa, että se suunnitellaan toistaiseksi aina tapauskohtaisesti. Vaatimuksena on, että tuennan korkeus on oltava sellainen, että tukipinta jää ulos eristeestä. (Metso Power Oy 2007, s. 2)



Kuva 6. Alta kannakoitu, liukutuettu kanava. (Metso Power Oy 2007, s. 2)

Kuvassa 6 on esitetty leikkauskuva alta kannakoidusta vaakasuuntaisesta kanavasta ja sen tuista. Kanavan lämpöliike on estetty sivusuunnassa kynsiohjaimin, mutta pitkittäis-suuntaisesti laajenemisliike on suunniteltua. Liukupinnan materiaali on valittava niin, ettei pinnat kulu epätavallisen paljon tai huonoimmassa tapauksessa hitsaudu kiinni toisiinsa. Kitkaa vähennetään tarvittaessa liukulaakerein.

Riippuva kanava tuetaan yleisesti tukipalkilla sekä tukitangoilla kuvan 7 mukaisesti. Sääto oikeaan korkeuteen tapahtuu vanttiruuvein. Ohjauselementtien kiinnitys palkkiin sekä palkin rakenteellinen toteutus vaihtelee paljon. Tarkastelemissani projekteissa oli tilanteesta riippuen käytetty tukipalkkia tai koko kanavan ympäröivää porttirakennetta.

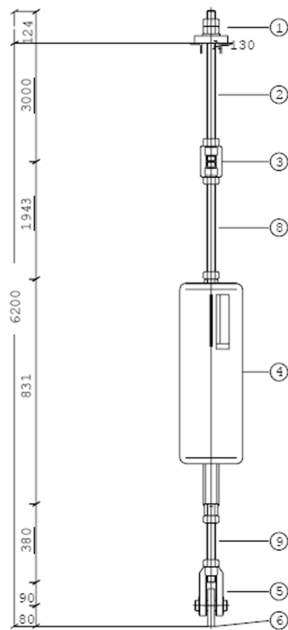


Kuva 7. Riipputuenta suorakaidekanavalle sekä pyöreälle kanavalle. (Metso Power Oy 2007, s. 3)

On huomioitavaa, että kuvan osoittama ratkaisu on toistaiseksi vain suuntaa antava eikä rajoita suunnittelijan vapauksia. Toteutuneet ratkaisut ovat usein layoutiin ja suunnittelijan omiin näkemyksiin sopeutettuja variaatioita ohjeesta. Tukipalkki tai -portti voi olla hitsattu osaksi jäykisteitä, ja tämä yleensä onkin järkevää. Hitsaus tapahtuu joko konepajalla tai työmaalla. Kuvan mukainen rakenne on hyvin yksinkertainen ja tällä on vaikutusta myös sen hintaan. Hinta pysyy verrattain alhaisena, mutta samalla käyttökohteet asettavat rajoitteita. Suurten liikkeiden kompensointiin ja muihin erityistilanteisiin on

valittava mukautuvammat rakenteet. Tarvittaessa käytetään jousikannakkeita tai vakiovoimakannakkeita. Tarve, kannaketyyppi ja toimittaja ovat toistaiseksi tapauskohtaisesti aina määriteltäviä.

Vertikaalista liikettä kompensoitaessa on tarpeen käyttää ratkaisuja, jotka sallivat kanavan niaamisen tietyissä rajoissa. Jousielementit käyvät tilanteisiin, joissa hallitaan yhtenä vapausasteena pientä pystysuuntaista siirtymää. Toiminta perustuu esiasetettuun kierrejouseen, joka jakaa vaihtelevan rasituksen jousen koko liikealueelle. Jousien kannatusvoimat vaihtelevat kylmän ja kuuman tilan välillä määrätyn jousivakion mukaisesti. (Lisega 2014a)



Kuva 8. Lisegan koteloitu jousikannake. (Valmet Power 2012)

Vaihtelun on oltava suhteellisen pientä, että jousikannakkeita voidaan käyttää. Lisäksi valintaan vaikuttaa asennuskohteen layout, sillä jousirakenne on tyypillisesti riipputuenta. Mikäli tilaan ei sovi tämän kaltainen ratkaisu, on mietittävä lähestymistapaa uudelleen. Jousikannakerakenne voidaan toteuttaa myös tietynlaisena iskunvaimentimena, jolloin se kannakoidaan kanavan alapuolelta. Riippuva tuenta on kuitenkin tyypillisempi tapa käyttää jousielementtejä.

Vakiovoimakannake on toinen tilausosaratkaisu, joka on huomattavasti edellä mainittuja ripustinrakenteita monimutkaisempi. Vakiovoimakannakkeita käytetään kohteissa, joissa tapahtuu suurta vertikaalista liikettä. Tällaisissa tilanteissa jousikannakkeen liikealue tai muut raja-arvot ylittyvät, joten ne eivät ole soveltuvia ratkaisuja. Kannake ottaa vastaan kuorman koko liikealueella tasaisesti ilman merkittäviä poikkeamia ja kannatusvoima pysyy samana kylmän ja kuuman tilan välillä. Tällä on vaikutusta erityisesti kohteen pitkäikäisyyteen. (Lisega 2014b) Kannakkeen työkuva sekä kanavan kannakkeen porttirakenne on esitetty kuvassa 9.

3 TUTKIMUSMENETELMÄT

Kannakesuunnitteluun tutustuminen tapahtui tarkastelemalla Valmet Powerin jo asiakkaalle luovutettujen projektien laitosmalleja. Yrityksessä on laajasti käytössä laitos-suunnittelussa PDMS-ohjelmisto (Plant Design Management System), jonka tuottamia kuvia tässäkin työssä on esillä.

Pääasiallisina tutkimusmenetelminä ovat rakenteiden lujuusopillinen tarkastelu sekä modulaarisuuden etsiminen ratkaisuihin helpottamaan suunnittelua, valmistusta ja asennusta. Kehitys tehdään siis kannakkeiden rakenteellisiin ratkaisuihin, ja sillä on suora vaikutus liiketoimintaan säästöinä. Säästöt eivät ole pelkästään rahallisten kulujen vähentämistä vaan siihen kuuluu myös välillisiä säästöjä suunnittelutyön ja ratkaisuvaihteluiden pienentyessä.

Tutkimustyötä tukemaan suoritettiin haastatteluja aihepiirin asiantuntijoiden kanssa. Asiantuntijat valittiin eri alojen piiristä, sillä suunnittelutyötä haluttiin tarkastella mahdollisimman eriävistä näkökulmista sekä saada mahdollisimman kattava kokemusperäinen pohjatieto. Tärkeitä tarkastelutasoja ovat esimerkiksi asennettavuus ja eristettävyyden.

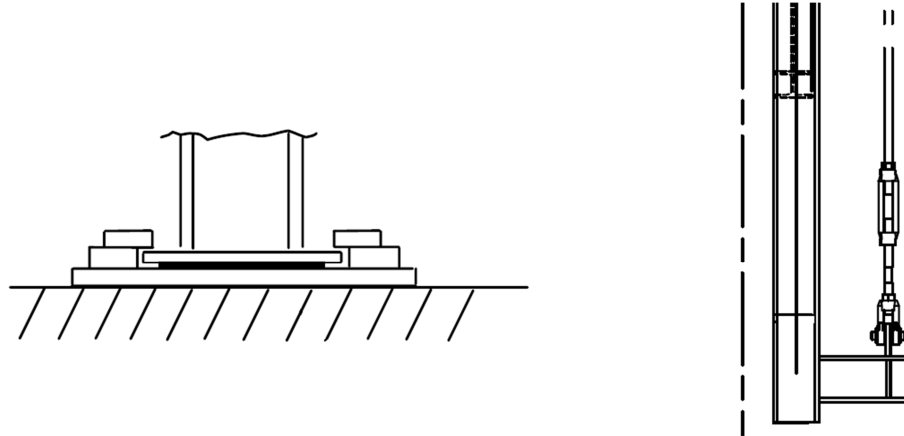
3.1 Modulointi

Modulointi tarkoittaa tuotteen hajottamista erilaisiin toiminnallisiin osiin, moduuleihin. Tavoitteena on saada osamoduuleita yhdistelemällä mahdollisimman laaja tarpeen kattava tuotevalikoima. Toiminta lisää mahdollisuuksia rakenteen toistuvaan käyttöön ja ohjattuun valmistukseen, ja samalla välttää toistuvaa suunnittelutyötä työn teknisessä suunnitteluvaiheessa ja tuotekehityksessä. (Teivas 1985, s. 11) Modulaarisuuden tehtävänä on siis toteuttaa muutokset teknisessä, rakenteellisessa järjestelmässä, mutta sen tavoitteet ulottuvat rakenteen lisäksi liiketoimintajärjestelmään.

Moduulirakenteisella tuotteella voidaan saavuttaa useampia tuotteita, tuotetyyppejä ja rakennekokoja. Tämä on erittäin tärkeässä asemassa kanavakannakkeiden vaatimuksia pohtiessa. Moduulijärjestelmää suunniteltaessa on määriteltävä jokaisen kannakekomponentin toiminto, joista yhdessä muodostuu toimiva kokonaisuus. (Lehtonen 2007, s. 7) Toiminnoista voidaan erottaa eri asteisia toimintoja. Tällaisia ovat esimerkiksi perustoiminnot, apustoiminnot, erikoistoiminnot sekä liitäntätoiminnot. Perustoiminto on järjestelmän perusta, eikä se vaihtelee periaatteeltaan. Tämä moduuli on välttämätön järjestelmän toiminnan kannalta. Apustoiminto saadaan aikaiseksi liittämällä perusmoduuliin kokonaisuuden kannalta välttämättömiä apumoduuleja. Erikoistoiminnot ovat täydentäviä ja tapauskohtaisia alitoimintoja, joita ei aina tarvita. Liitäntätoiminto tarvitaan liittäessä muihin järjestelmiin. Liityntöjen parametreja ei ole etukäteen määritetty, vaan ne ovat mahdollisia, usein välttämättömiä toimintoja. (Lehtonen 2007, s. 44-47)

Valmetin kannakeratkaisut ovat ainakin näennäisesti modulaarisia ja niissä on erotettavissa tietyt rikkomattomat rajapinnat ja osat.

Tarkastellessamme modulaarisuuden periaatteita kannakoinnissa, voidaan kannake-tyyppikatalogi mieltää tuoteperheeksi, jossa eri variaatiot tuottavat erilaisia tukirakenteita. Rajapinnat liitetään siis toimintoihin, joita eri osajärjestelmät tuottavat. Esimerkki osajärjestelmistä on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Osajärjestelmät: alapuolinen tuenta sekä yläpuolinen riipputuenta. (Metso Power Oy 2007, s. 2)

Tarkastellaan vasemmanpuoleista kannakejalkaa. Kyseessä on kanavan alapuolelta tuettu liukuratkaisu, jossa kanavan molemmille kyljille sijoitetut jalat liukuvat sopivan alusmateriaalin päällä ja haluttu liikesuunta on rajattu kynsiohjaimin. Osajärjestelmä ottaa vastaan siis kanavan kuorman sekä ohjaa liikkeen. Yhdelle osajärjestelmälle annetaan tällaisissa ratkaisussa kaksi toimintoa.

Kuvan oikealla puolella on esitetty yläpuoleisesta tasosta kannakoidun kanavan tuenta. Pystypalkki hitsataan kiinni kanavan kylkiin vastaavasti molemmin puolin ja kannatus tapahtuu uloketankoon kiinnitetyllä riipputangolla. Tämä osajärjestelmä toteuttaa pelkästään kannakointitoiminnon ottamalla vastaan kuormat, ja ohjaus toteutetaan toisin menetelmin. Osakokonaisuudesta tulee hallittavampi ja moduuliratkaisuna tiiviimpi. Joissain tapauksissa toimintoja ei ole mahdollista karsia samalla tehokkuudella, mutta karsinta on modulaarisuuden menetelmien valossa haluttu ominaisuus. Merkittävän eron ratkaisuissa tekee kannakoinnin suunta. Alapuoleisesta tasosta kannakoidussa kanavassa ratkaisussa on usein yhdistettävä tuenta ja ohjaus.

3.2 Design for Manufacture

Design for Manufacture (DFM) tarkoittaa valmistettavuuden huomioonottavaa tuotekehityksen lähestymistapaa, jossa suunnittelutoimet ottavat kantaa valmistettavuuden näkökohtiin jo varhaisessa vaiheessa. (Ferrer et al. 2009, s. 420) Valmistettavuus tarkoittaa konepajatoimintaa laajemmin kaikkea tuottavuutta lisäävää toimintaa. DFM:ssä otetaan huomioon valmistettavuusnäkökohta jo varhaiselta tuotekehityksen konseptitasolta

asti. Sen ensisijaisena käyttötarkoituksena on uusien tuotesukupolvien luominen, valmistettavuusongelmien siirtymisen esto toimialueelta toiselle sekä suunnittelutiimin fokuksen pitäminen selkeissä ja käytännön tason tavoitteissa. (Fabricius 2003, s. 3)

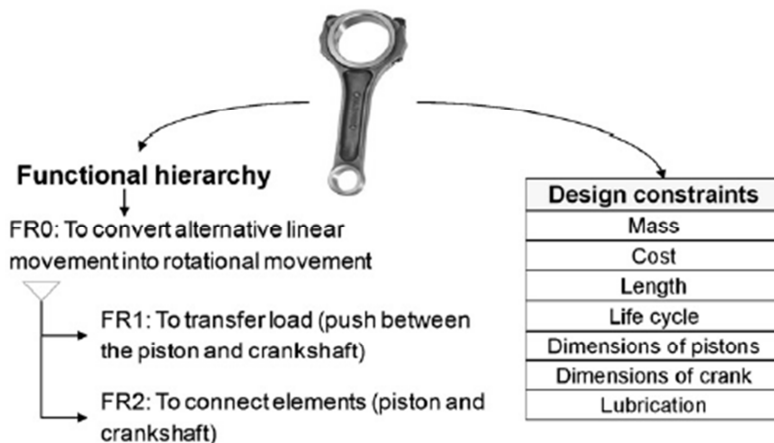
Seuraavassa esitetään paradigman mukainen niin sanottu seitsemänportainen menetelytapa, jonka tavoitteena on ohjata suunnittelijoita kehityskohteesta riippuen parhaaseen konseptitason ratkaisuun. Konseptitason idean selkeytyksen jälkeen on suunnittelijan liitettävä tuotekonsepti valmistuskonseptiin. Standardoitujen askelten läpikäyminen johtaa uuden ratkaisun myötä myös välillisesti kokonaisvaltaiseen kilpailukyvyyn kasvuun. (Fabricius 2003, s. 5)

3.2.1 Konseptisuunnittelun seitsemän porrasta

Paradigma kuvaa seitsemän aktiviteettia, jotka tulee käydä läpi järjestyksessä parhaan ratkaisun saavuttamiseksi ja kilpailukyvyyn nostattamiseksi. Esimerkiksi, jos kehitysprojehtin aiheena on laitteen tai konstruktion rakentaminen, DFM:n tarkoitus on selkeyttää suunnittelijoille ajatusketju – eli ongelman tunnistamisen ja ratkaisuun päättymisen jono – johon suunnittelutyö sekä toteutus perustuvat.

Ensimmäinen askel on DFM diagnoosin teko. Tämä sisältää kehityskohteen nykyratkaisujen, keskenään kilpailevien tuotteiden ja tuoteperheiden kartoittamisen, sillä uudella kehitystyöllä pyritään korvaamaan vanha, tehottomampi tapa toimia. Toinen askel on tavoitteiden asettaminen. Kehityskohteella on oltava selkeästi määritellyt vaatimukset, jotka valmiin tuotteen on täytettävä. Mahdollisia lähestymistapoja ovat esimerkiksi kustannukset, laatu, valmistuksen läpimenoaika ja ympäristö. Eri näkökannoille annetaan halutut prioriteetit, painoarvot, jotka voivat olla eroavaisia. Tämä vaihe on kriittisen tärkeä dokumentoida tarkasti, sillä sen on oltava kaikille osapuolille selkeä. Jokaisen suunnittelijan on pyrittävä samaan tavoitteeseen. (Vallhagen et al. 2013, s. 153)

Seuraava, kolmas vaihe on kohteen päätoimintojen tunnistaminen. Toiminnoista voidaan tehdä esimerkiksi vuorovaikutuskaavio, josta nähdään systeemin sisäiset vuorovaikutukset eri osien välillä. Periaatetta on esitelty kuvassa 11.



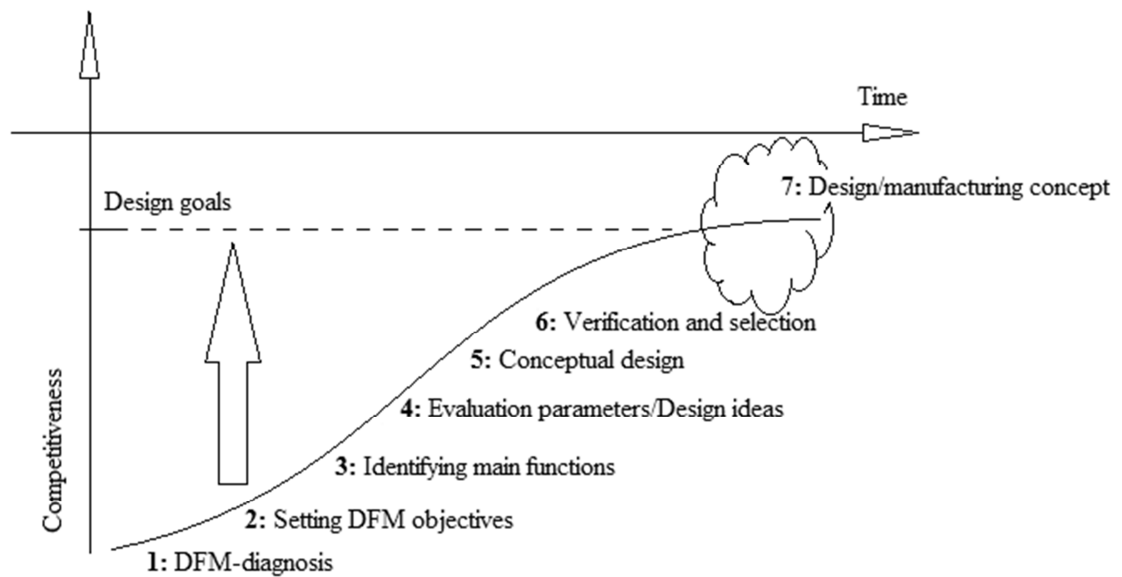
Kuva 11. Päätoimintojen hierarkiakaavio (Ferrer et al. 2009, s. 425)

Komponentti hajoitetaan päätoiminnoikseen. Tämä siirtää fokuksen aiemmasta muotoilusta ja rakenteellisesta konstruktiosta saman toiminnallisuuden saavuttamiseen parhaalla mahdollisella tavalla. Funktiohierarkia kuvaa komponentin päätoiminnon lisäksi sen vaikutukset eri rajapintojen välillä sekä mahdolliset muut osatoiminnot. (Fabricius 2003, s. 23) Päätoiminnoille on annettu tunniste FR0 ja osatoiminnoille tunnisteet FR1 ja FR2.

Vaihe neljä on suunnitteluideoiden ja vaatimusten selkeyttäminen eli toisin sanoen parametrien arviointi. Edellä läpikäytyt vaatimukset ja toiminnot on sidottava reaali-maailman ratkaisuihin ja ne on mietittävä valmistettavuuden ja tuotelaadun kannalta. Tässä vaiheessa pohdittavana on, mitkä arviointiparametrit ovat määrääviä ideoiden toteuttamisen kannalta. (Fabricius 2003, s. 23-25)

Viidentenä vaiheena on konseptisuunnittelu. Tämän tarkoituksena on luoda uusia, aiempien vaiheiden parhaista ideoista ammentavia modulaarisia ratkaisuja. Konseptit ovat tässä vaiheessa vielä luonnoksia, ei mittavalmiita CAD-malleja. On tärkeää luoda useita erilaisia konsepteja, joiden välillä on eri parametrien kannalta suorituskykyeroja. Tällöin otannan alueelta voidaan valita optimiratkaisu. (Fabricius 2003, s. 26)

Seuraava vaihe on arviointi ja ratkaisun valinta. Valinnassa on otettava huomioon muun muassa kohteen valmistettavuus, riskit, läpimenoaika ja kehittämisen hinta. Tämän jälkeen, viimeisessä vaiheessa, aloitetaan valmistus, markkinointi ja jatkokehitys. Seitsemänportaisen tuotekehitysmallin periaatekuva on esitettyä kuvassa 12.



Kuva 12. The seven step DFM procedure. (Fabricius 2003, s. 25)

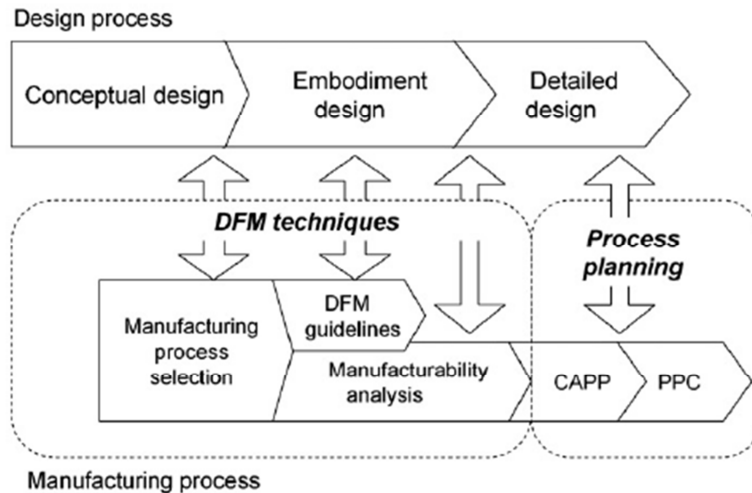
Kuva havainnollistaa askelten vaikutusta kilpailukyyn kasvuun. Kuvaan on merkitty katkoviivalla kehityskohteelle asetettujen tavoitteiden taso, johon koko prosessin ketju suuntaa. Konseptitason ideapilvi on tavoite porrasmallissa, mutta se on vasta lähtökohta detaljisuunnittelulle.

3.2.2 DFM -tekniikat

Tärkeä osa DFM ajatusmaailmaa on jatkuva suunnitteluideoiden ja todellisen valmistussuunnitelman yhtenäisen linkittäminen. Suunnitelmallisia linkkejä voidaan muodostaa neljällä eri tasolla: Yrityksen tuotevalikoiman tasolla, tuoteperhetasolla, rakennetasolla ja komponenttitasolla. Yrityksen tuotevalikoimatasolla on vertailtava yhtenäisyyksiä olemassaolevien tuotetyyppien välillä. Tuoteperheet sen sijaan voivat sisältää samankaltaisten tuotteiden eri variaatioita. Rakennetasolla tuotteen ulkomuodot ja konstruktioominaisuudet ovat tarkastelun alla ja komponenttitasolla jokainen komponentti suunnitellaan erikseen ja uudelleen. (Fabricius 2003, s. 8-9)

Suunnitelmatasot sitovat tuotekehitysprojektin yhteen ja kokonaisuus palvelee jokaista sidosryhmää. On olemassa esimerkkejä tilanteista, joissa keskitytään suurilta osin projektin komponenttitason yksityiskohtiin, eikä oteta huomioon mahdollisia hyötyjä tuoteperhetasolla. Tällä on myös välillistä vaikutusta ylemmälle organisaatiotasolle tuotevalikoiman rajautumisen kautta. On siis aina pohdittava kehityskohteen laajempaa potentiaalia valmistussuunnitelmaa tehdessä.

Tuotevalmistus tapahtuu usein rinnakkaissuunnitteluna (Concurrent Engineering), jossa valmistuksen liittäminen tuotantoon on kaiken toiminnan perustana. Tuoteidea päätoimintoinen on siis tässä vaiheessa jo selvillä. Rinnakkaissuunnittelussa käytettävää DFM tekniikkaa on havainnollistettu kuvassa 13.



Kuva 13. Valmistuksen liittäminen suunnitteluprosessiin. (Ferrer et al. 2009, s. 421)

Prosessin konseptisuunnitteluvaiheessa on tehtävä valinta valmistustekniikasta. Valinta on usein teknisesti tai kustannuksiltaan paras ratkaisu kyseiselle kehityskohteelle. Suunnitteluvaatimuksia peilataan valmistusprosessien ominaisuuksiin jatkuvasti, ja tietyt parametrit kuten toleranssit tai saavutettavat pinnankarkeudet rajaavat valintaa. Usein suunnittelun apuna voi olla käytössä myös eri aloista riippuvia valintatyökaluja. (Ferrer et al. 2009, s. 421)

Valmistusprosessin rajauksen jälkeen DFM vaatimukset ovat olennaisia eri valmistusnäkökantojen vertailussa. Vaatimukset toimivat suuntaviivoina kehityskohteen parannuksille ja sille, kuinka ne muuttavat sen ulkoisia muotoja, materiaaleja ja dimensioita. Valmistusanalyysissä suoritetaan arviointi, valitaan valmistustekniikka, ja siirrytään detaljitason suunnitteluun. Detaljitason suunnitelmissa toiminta on fokusoitunut rinnakkaisuunnittelun osalta pikemminkin prosessin ja tuotannon suunnitteluun kuin DFM tekniikoihin. Tällä osa-alueella toiminta liittyy enemmänkin käytännön tason yksityiskohtien optimointiin. (Ferrer et al. 2009, s. 421)

3.3 Lujuusopilliset vaatimukset

Kannakerakenteiden suunnittelu edellyttää lujuusopin teorian ja menetelmien tuntemusta. Suunnittelijan työ vaatii perehtyneisyyttä myös materiaaliominaisuuksiin ja rakenteita koskeviin standardeihin. Rakenteiden vaatimuksiin vaikuttavat myös laitoimituksen kohdemaan standardit, yrityksen sisäiset ohjeet sekä asiakkaan sopimat vaatimukset.

Käytettävän materiaalin valintaan vaikuttavat sen ominaisuudet sekä esimerkiksi massa ja hinta. Valitun kannakemateriaalin tulee olla kestävyydeltään sopiva. Kanavakannakkeiden materiaalina käytetään standardissa määriteltyjä rakenneteräksiä, jotka ovat yleisesti tunnettuja ja laajasti käytettyjä. Rakenneterästen materiaaliominaisuuksia on esitelty taulukossa 1.

Taulukko 1. Rakenneterästen myötörajan ja vetomurtolujuuden nimellisarvot. (SFS-EN 1993-1-1 2005, s. 26)

Standardi ja teräslaji	Nimellispaksuus t [mm]			
	t ≤ 40 mm		40 mm < t ≤ 80 mm	
	f _y [N/mm ²]	f _u [N/mm ²]	f _y [N/mm ²]	f _u [N/mm ²]
EN 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	470
S 450	440	550	410	550

Kannakerakenteet toteutetaan useimmiten joko S 235 tai S 355 teräslajeilla, sillä niiden eri profiilit ovat yleisiä ja laajassa käytössä varsinkin Euroopassa. Globaalit näkökohdat pohditaan erikseen vertailemalla nimellisarvoja esimerkiksi vastaaviin aluekohtaisiin standardiprofiilitaulukoihin.

3.3.1 Valmet Powerin kanavas suunnitteluohjeen asettamat ehdot

Kanavien laskennassa tarkastelukohteita ovat kannakerakenteet, jäykistämateriaali sekä kanavan levymateriaali. Levymateriaalin ja jäykisteiden suunnittelussa otetaan huomioon yleisesti kaksi parametria: lämpötila ja suunnittelupaine. Kanavat laajenevat lämpötilan vaikutuksesta ja niissä vallitsee yli- tai alipaine. Tässä työssä ei oteta kantaa paineen ja kaasuvirtauksen vaikutuksiin kanavan levykentissä, mutta se on erittäin tärkeää huomioida ilmiönä osavarmuuskertoimin sekä konservatiivisin tarkastelumenetelmin kannakkeiden laskennassa. (Metso Power 2013a, s. 1-2)

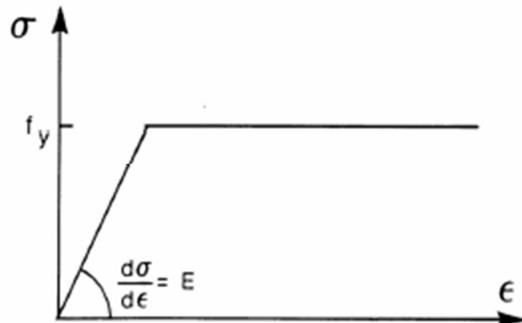
Kanavakannakkeissa ei yleensä vallitse niin suuria lämpötiloja, että viruminen olisi otettava huomioon käytetyissä teräsprofiileissa. Eristekerroksen sisäpuolella vallitseva lämpötila aiheuttaa teräksille kuitenkin muodonmuutoksia, jotka on olennaisesti huomioitava suunnittelussa.

3.3.2 Jännityksen ja venymän välinen yhteys

Tärkeimpiä materiaalien lujuusopillisista ominaisuuksista ovat jännitysten ja venymien välinen yhteys sekä materiaalin kyky kestää siihen kohdistuvaa kuormitusta murtumatta. Materiaalin jännitysten ja venymien välistä yhteyttä kuvaa materiaaliyhtälö $\sigma = \sigma(\epsilon)$, missä σ kuvaa jännitystä ja ϵ venymää. Materiaaliyhtälöä kutsutaan yleisesti myös $\sigma\epsilon$ -yhteydeksi. (Outinen & Salmi 2004, s. 34)

Jännitys on tiettyyn arvoon, suhteellisuusrajaan σ_p (proportional limit) asti suoraan verrannollinen venymään. Vaikka jännitys kasvaisikin, on venymä materiaalissa vielä täysin palautuvaa eli materiaali käyttäytyy kimmoisesti. Jännityksen ylittäessä kimmo-
rajan σ_E (elastic limit) jää kappaleeseen pysyvä venymä kuormituksen poistamisen jäl-
keen. Venymän edelleen kasvaessa saavuttaa jännitys myötörajan f_y (yield limit), jolloin

venymä kasvaa tarvittavan voiman kuitenkin lisääntymättä. Tätä käyrän aluetta kutsutaan myötöalueeksi. Jännityksen ja venymän välinen kaksoislineaarinen yhteys on esitetty kuvassa H.



Kuva 14. Kaksoislineaarinen jännitys-venymä-yhteys (SFS-EN 1993-1-1 2005, s. 42)

Monilla korkean lujuusluokan teräslaaduilla ei esiinny selvää myötörajaa, mutta niillä on jännitys-venymäkäyrässä derivaatan epäjatkuvuuskohta, jonka jännityksen arvoa käytetään usein myötörajana. (Outinen & Salmi 2004, s. 35-36)

3.3.3 Kimmoteoria ja plastisuusteoria

Jännitys-venymäyhteyden materiaaliyhtälön yksinkertaisin muoto on Hooken laki $\sigma = E\epsilon$, missä E on kimmomoduuli (elastic coefficient). Kimmomoduuli kuvaa materiaalin jäykkyyttä tarkasteltavassa pisteessä ja se on jännityksen yksikkö. Hooken laki olettaa materiaalin olevan lineaarisesti kimmoisaa ja siihen sisältyvä kerroin E on materiaalin käyttäytymistä kuvaava kimmokerroin. Hooken laki on voimassa materiaalin kimmorajaan asti. (Outinen & Salmi 2004, s. 38-40)

Rakenteellisten osien ja hitsausliitosten kestävyys sekä jännitykset voidaan laskea kahdella eri teorialla, kimmoteorialla tai plastisuusteorialla. Kimmoteoria on perinteisempi mitoitus tapa hitsatuissa rakenteissa. Se olettaa jännitysten ja siirtymien välillä olevan lineaarinen riippuvuus Hooken lain mukaan. Lineaarinen kimmolaki pätee erinomaisesti tavalliseen rakenneteräkseen aina myötörajaan asti. (Niemi & Kemppi 1993, s. 137-138)

Plastisuusteorian mukaisessa kokonaistarkastelussa otetaan huomioon materiaalin epälineaarisuuden vaikutukset laskettaessa rakennejärjestelmän voimasuureita. Plastisuusteorian mukaista kokonaistarkastelua voidaan käyttää, kun kohteella on riittävä kiertymiskyky, joka mahdollistaa vaadittavan taivutusmomenttien uudelleenjakaantumisen. Kuvan 14 mukaista kaksoislineaarista jännitys-venymä -yhteyttä voidaan käyttää taulukon 1 mukaisille teräslajeille. (SFS-EN 1993-1-1 2005, s. 42)

3.4 Kannakkeen palkkirakenteiden rajatilamitoitus

Eurokoodi -standardit ovat kantavien rakenteiden suunnittelua koskevia eurooppalaisia standardeja. Ne kattavat varmuuden määrittämisperiaatteet ja erilaiset suunnittelukoh-

teeseen kohdistuvat kuormat. Eurokoodi –standardit ovat luotu rakennusteollisuuden sekä maa- ja vesirakennuskohteiden suunnittelutarpeisiin, eivätkä ne kaikilta osin soveltu voimalaitosrakenteiden suunnitteluun. Eurocode 3 koskee teräsrakenteiden kestävyyttä, käytettävyyttä, säilyvyyttä ja palonkestävyyttä koskevia vaatimuksia ja sitä voidaan käyttää yhdessä muiden standardiasiakirjojen kanssa. (SFS-EN 1993-1-1 2005, s. 8)

Kanavakannakkeet ovat useimmiten I-, H-, U- tai RHS –profiileista sekä kulma- ja lattaraudoista ja suorista levyosista hitsaamalla koottuja rakenteita. Kyseiset profiilit ovat rakennusteollisuudessa yleisesti käytössä, ja tästä syystä Eurokoodi –standardit soveltuvat kannakerakenteiden suunnitteluun hyvin.

Tässä työssä rakenteiden suunnitteluun käytetään pääasiassa Eurokoodi 3 teräsrakenteiden suunnittelustandardin mukaista rajatilamitoitusta. Kannakerakennetta suunniteltaessa käytetään teoriaa, joka on esitetty standardin osassa 1-1: ”Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt”, 1-2: ”Rakenteen palomitoitus” sekä 1-8: ”Liitosten mitoitus”. Eurokoodin lisäksi käytössä on Rautaruukki Oyj:n hitsattujen rakenteiden käsikirja sekä Rautaruukin rakenneputkista valmistettujen rakenteiden oppikirja.

3.4.1 Rakenteita koskevat säännöt

Rakenteen kestävyydellä tarkoitetaan kykyä kantaa rakenteeseen kohdistuvat kuormat ilman murtumista tai liian suuria muodonmuutoksia. Kestävyys ja kuorma vaihtelevat aina ajan ja paikan suhteen. Niillä ei siis ole absoluuttista arvoa, vaan niiden arvot jakaantuvat tilastollisen todennäköisyyden mukaan. (Rautaruukki Oyj 2012, s. 43)

Rajatilat voidaan jaotella käyttörajatiloihin ja murtorajatiloihin. Käyttörajatilalla tarkoitetaan rakenteen tilaa, jonka ylittyessä sille asetetut käyttökelpoisuusvaatimukset eivät täyty. Käyttörajatila voidaan jakaa palautuvaan ja palautumattomaan käyttörajatilaan. Palautumattomassa käyttörajatilassa rakenteen kaikki käyttökelpoisuusvaatimukset eivät palaudu ennalleen, kun kuormat poistetaan. Palautuvassa tilassa näin tapahtuu. Käyttörajatilan ilmiöitä ovat rakenteessa tapahtuvat taipumat ja siirtymät, joilla on vaikutusta rakenteen toimivuuteen tai ulkonäköön. (Rautaruukki Oyj 2010, s. 525)

Murtorajatilalla tarkoitetaan rakenteen lopullisen vaurioitumisen tilaa, jossa se menettää stabiiliteettinsä. Vaurioituminen voi tapahtua esimerkiksi liian suurista siirtymistä tai rakenteen väsymisilmiöistä. Kannakerakenteet voidaan mitoitaa Eurokoodin mukaisella murtorajatilan yleisellä mitoitus ehdolla, joka on muotoa:

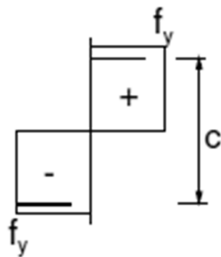
$$E_d \leq R_d \quad (1)$$

missä E_d on kuorman aiheuttaman voiman tai momentin mitoitusarvo ja R_d on rakenteen kestävyuden mitoitusarvo. Eurokoodissa 1-1 esitellään murtorajatiloihin liittyviä kestävyuden osavarmuuslukuja γ_M . Poikkileikkausten kestävyydelle suositellaan käytettäväksi arvoa $\gamma_{M0} = 1,00$. Sauvojen kestävyydelle stabiiliuden suhteen tarkastuslaskuissa käytetään arvoa $\gamma_{M1} = 1,00$. (SFS-EN 1993-1-1 2005, s. 48) Osavarmuusluvusta lisää seuraavissa alaluvuissa.

3.4.1.1 Poikkileikkausluokitus

Poikkileikkausluokituksen tarkoitus on tunnistaa missä laajuudessa poikkileikkausten paikallinen lommahdus rajoittaa kestävyyttä ja kiertymiskykyä. Poikkileikkausluokat määritellään seuraavasti: Poikkileikkausluokat 1 ovat niitä, joissa plastisuusteorian mukaisen tarkastelun vaatima, riittävän kiertymiskykyinen nivel voi syntyä ilman, että poikkileikkauksen kestävyyttä tarvitsee pienentää. Poikkileikkausluokat 2 ovat sellaisia, joissa voi kehittyä plastisuusteorian mukainen sauvan taivutuskestävyys, mutta joilla paikallinen lommahdus rajoittaa kiertymiskykyä. Poikkileikkausluokat 3 ovat niitä, joissa sauvan äärimmäisessä puristetussa reunassa laskettu jännitys voi saavuttaa myötörajan, mutta paikallinen lommahdus estää plastisuusteorian mukaisen momenttikestävyyden kehittymisen. Poikkileikkausluokat 4 ovat sellaisia, joissa paikallinen lommahdus esiintyy ennen kuin myötöraja saavutetaan poikkileikkauksen jossain pisteessä. (SFS-EN 1993-1-1 2005, s. 42)

Plastisuusteorian mukainen kokonaistarkastelu asettaa vaatimuksia poikkileikkauksille: Plastisen nivelen kohdassa poikkileikkauksella tulee olla riittävä kiertymiskyky, joka on vähintään kyseisessä nivelessä vaaditun kiertymän suuruinen. Laskennassa on otettava huomioon taivutettujen palkkien leveys-paksuus-suhde käytetyn profiilin poikkileikkausluokan mukaisesti. (SFS-EN 1993-1-1 2005, s. 43-45)



Kuva 15. Taivutetun taso-osan jännitysjakautuma. (SFS-EN 1993-1-1 2005, s. 45)

Mitoitettavan palkkiprofiilin on toteutettava leveys-paksuus-suhteen käyppyysehto taivutuskestävyyttä laskettaessa. Käyppyysehto on eroteltu poikkileikkausluokittain seuraavasti:

Poikkileikkausluokalle 1:

$$c/t \leq 72\varepsilon \quad (2)$$

Poikkileikkausluokalle 2:

$$c/t \leq 83\varepsilon \quad (3)$$

Poikkileikkausluokalle 3:

$$c/t \leq 124\varepsilon \quad (4)$$

missä c on uuman korkeus, t on uuman paksuus ja ε on mitoitettavan rakenneteräksen nimellisestä myötölujuudesta f_y riippuva osavarmuustekijä, joka määräytyy kaavasta 4 taulukon 2 mukaisesti:

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} \quad (5)$$

Taulukko 2. Teräsrakenteiden osavarmuuskertoimia. (SFS-EN 1993-1-1 2005, s. 45)

f_y (N/mm ²)	235	275	355	420	460
ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

On huomioitava, että kaavat ovat soveltuvia laskettaessa teräsprofiilipalkin taivutusta. Venytys- tai puristustilanteelle on olemassa omat käypyysehtonsa, jotka on täytettävä erikseen.

3.4.1.2 Osavarmuusluvut

Kestävyyksien ominaisarvoihin sovelletaan Eurokoodissa tiettyjä murtorajatilán osavarmuuslukuja γ_{Mi} ($i = 1, \dots, 7$), jotka ovat esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Liitosten osavarmuusluvut. (SFS-EN 1993-1-1 2005, s. 48; SFS-EN 1993-1-8 2005, s. 19)

Rakenneosien ja poikkileikkausten kestävyys	γ_{M0}	1,00
	γ_{M1}	1,00
	γ_{M2}	1,25
Ruuvien kestävyys	γ_{M2}	1,25
Niittien kestävyys	γ_{M2}	1,25
Niveltappien kestävyys	γ_{M2}	1,25
Hitsien kestävyys	γ_{M2}	1,25
Reunapuristuskestävyys	γ_{M2}	1,25
Liukumiskestävyys	γ_{M3}	1,25
Injektioruuvien reunapuristuskestävyys	γ_{M4}	1,00
Rakenneputkien liitosten kestävyys ristikoissa	γ_{M5}	1,00
Niveltappien kestävyys käyttörajatilassa	$\gamma_{M6,ser}$	1,00
Ruuvien esijännitys	γ_{M7}	1,10

Taulukkoon on yhdistetty standardien SFS-EN 1993-1-1 sekä 1-8 suosittelemat osavarmuusluvut. Voimasuureen mitoitusarvo ei saa missään poikkileikkauksessa ylittää vastaavaa kestävyysmitoitustarvoa. Osavarmuuslukujen mahdolliset vaikutukset pitävät laskennan turvallisella puolella kaikissa tarkasteluissa.

3.4.2 Taivutuskestävyys

Taivutusmomentin mitoitusarvon M_{Ed} tulee täyttää ehto:

$$M_{Ed}/M_{c,Rd} \leq 1,0 \quad (6)$$

missä taivutuskestävyyden mitoitusarvo $M_{c,Rd}$ yhden pääjäyhyysakselin suhteen tapahtuvassa taivutuksessa lasketaan poikkileikkausluokan mukaan kaavoista 3, 4 tai 5:

Poikkileikkausluokalle 1 ja 2:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = W_{pl} \cdot f_y / \gamma_{M0} \quad (7)$$

Poikkileikkausluokalle 3:

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = W_{el,min} \cdot f_y / \gamma_{M0} \quad (8)$$

Poikkileikkausluokalle 4:

$$M_{c,Rd} = W_{eff,min} \cdot f_y / \gamma_{M0} \quad (9)$$

missä W_{pl} on poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen taivutusvastus, $W_{el,min}$ on kimmoteorian mukaisen taivutusvastuksen minimiarvo ja $W_{eff,min}$ on tehollisen taivutusvastuksen pienin arvo. $W_{el,min}$ ja $W_{eff,min}$ lasketaan poikkileikkauksen reunassa vaikuttavan suurimman kimmoteorian mukaisen jännityksen perusteella. (Rautaruukki Oyj 2010, s. 117-121; SFS-EN 1993-1-1 2005, s. 53)

3.4.3 Leikkauskestävyys

Leikkausvoiman mitoitusarvon V_{Ed} tulee kaikissa palkkipoikkileikkauksissa täyttää ehto:

$$V_{Ed} / V_{c,Rd} \leq 1,0 \quad (10)$$

missä $V_{c,Rd}$ on leikkauskestävyyden mitoitusarvo. (SFS-EN 1993-1-1 2005, s. 54) Plastisuusteorian mukaisessa mitoituksessa $V_{c,Rd}$ vastaa leikkauskestävyyden mitoitusarvoa $V_{pl,Rd}$, joka lasketaan kaavan 7 mukaan:

$$V_{pl,Rd} = A_v \cdot (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0} \quad (11)$$

missä A_v on leikkauspinta-ala. Leikkauspinta-ala valssaamalla valmistetuille U-profiileille, joissa kuormitus on uuman suuntaista, voidaan laskea kaavasta 8:

$$A_v = A - 2bt_f + (t_w + r) \cdot t_f \quad (12)$$

missä A on poikkileikkauksen pinta-ala, b on profiilin kokonaisleveys, t_f on laipan paksuus, t_w on uuman paksuus ja r on nurkan pyöristyssäde. (SFS-EN 1993-1-1 2005, s. 54-55)

3.4.4 Leikkauslommahduskestävyys

Profiilin uuman ollessa riittävän hoikka, se voi lommahtaa leikkausvoiman vaikutuksesta ennen kuin plastinen leikkauskestävyys saavutetaan. Leikkauslommahduskestävyyttä voidaan parantaa uuman poikittaisjäykisteillä ja pituussuuntaisilla jäykisteillä. Toimenpide tosin usein lisää suunnittelu- ja valmistuskustannuksia enemmän kuin mitä uuman ainepaksuuden ohenemisesta säästettäisiin materiaalikustannuksissa. (Rautaruukki Oyj 2010, s. 154) Leikkauslommahduskestävyys tulee tarkistaa poikkileikkausluokasta riippumatta uumastaan jäykistämättömille profiileille, joille uuman korkeus-paksuus-suhde:

$$\frac{h_w}{t_w} > \frac{72\varepsilon}{\eta} \quad (13)$$

missä η on muokkauslujittumisen huomioon otettava tekijä. Kannakerakenteissa käytettävälle taulukon 1 mukaisille teräksille $\eta = 1,20$. Osavarmuus ε määritetään luvun 3.4.2. kaavalla 4. Poikittaisjäykisteillä jäykistetyille uumalle on tarkistus tehtävä kun on voimassa:

$$\frac{h_w}{t_w} > \frac{31}{\eta} \varepsilon \sqrt{\kappa_\tau} \quad (14)$$

missä κ_τ on leikkauslommahduskerroin. Tämän työn puitteissa ei palkkiprofiilien uumia jäykistettä, ellei siihen erikseen ilmene tarvetta. Leikkauslommahduskertoimelle on esitetty vaihtelevia suosituksia Rautaruukki Oyj:n Hitsatut profiilit EN 1993 –käsikirjassa sivulla 157. Mikäli ehdot 11 ja 12 eivät täyty, ei leikkauslommahduskestävyyttä tarvitse sen merkityksettömyydestä johtuen ottaa huomioon. (Rautaruukki Oyj 2010, s. 155)

3.4.5 Kestävyys taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutukselle

Leikkausvoiman vaikutus taivutusmomenttikestävyyteen on otettava huomioon, kun leikkausvoima on suurempi kuin puolet plastisuusteorian mukaisesta leikkauskestävyydestä. Mikäli leikkausvoima on pienempi kuin puolet leikkauskestävyydestä, sen vaikutus taivutusmomenttikestävyyteen voidaan jättää huomiotta paitsi, jos leikkauslommahdus pienentää poikkileikkauksen kestävyyttä. (SFS-EN 1993-1-1 2005, s. 57)

Muissa tapauksissa taivutusmomenttikestävyyttä pienennetään käyttämällä leikkauspinta-alalle pienennettyä myötörajaa:

$$(1 - \rho)f_y \quad (15)$$

missä

$$\rho = \left(\frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2 \quad (16)$$

ja $V_{pl,Rd}$ lasketaan kaavasta 9. (SFS-EN 1993-1-1 2005, s. 57)

3.4.6 Kiepahduskestävyys

Vahvemman pääjäyhyysakselin suhteen taivutettu sivusuunnassa tukematon palkkiprofiili mitoitetaan siten, että kiepahduksen suhteen seuraava ehto on voimassa:

$$M_{Ed}/M_{b,Rd} \leq 1,0 \quad (17)$$

missä M_{Ed} on taivutusmomentin mitoitusarvo ja $M_{b,Rd}$ on kiepahduskestävyyden mitoitusarvo. Mikäli profiili on riittävästi tuettu sivusuunnassa, se ei ole altis kiepahdukselle. Lisäksi neliön muotoiset tai pyöreät rakenneputket, hitsatut pyöreät profiilit tai neliön muotoiset koteloprofiilit eivät ole alttiita kiepahdukselle. Muissa tapauksissa kiepahdus on tarkistettava. (SFS-EN 1993-1-1 2005, s. 65)

Sivusuunnassa tukemattoman palkkiprofiilin kiepahduskestävyyden mitoitusarvo lasketaan kaavasta:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (18)$$

missä W_y on poikkileikkausluokasta riippuvainen taivutusvastus ja χ_{LT} on kiepahduskestävyyden pienennystekijä. W_y tulee kyseeseen seuraavasti:

Poikkileikkausluokissa 1 tai 2:

$$W_y = W_{pl,y} \quad (19)$$

Poikkileikkausluokassa 3:

$$W_y = W_{el,y} \quad (20)$$

Poikkileikkausluokassa 4:

$$W_y = W_{eff,y} \quad (21)$$

missä $W_{pl,y}$ on plastisuusteorian mukainen taivutusvastus, $W_{el,y}$ kimmoteorian mukaisen taivutusvastuksen minimiarvo ja $W_{eff,y}$ on tehollisen taivutusvastuksen minimiarvo. (SFS-EN 1993-1-1 2005, s. 65) Kiepahduskestävyyden pienennystekijä χ_{LT} lasketaan yleisessä tapauksessa kaavasta:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad \text{mutta } \chi_{LT} \leq 1,0 \quad (22)$$

$$\text{missä } \Phi_{LT} = 0,5 \cdot [1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2] \quad (23)$$

missä α_{LT} on epätarkkuustekijä,

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} \quad (24)$$

missä M_{cr} on kimmoteorian mukainen kriittinen momentti kiepahduksessa. (SFS-EN 1993-1-1 2005, s. 65-67) Se lasketaan bruttopoikkileikkauksien ominaisuuksien perusteella ottaen huomioon kuormitustilanne, todellinen momenttipinnan muoto ja asetetut reunaehdot. Kiepahduskäyriä vastaava epätarkkuustekijä α_{LT} valitaan taulukosta 4. (Rautaruukki Oyj 2010, s. 142)

Taulukko 4. Epätarkkuustekijä kiepahduskäyrän mukaan. (SFS-EN 1993-1-1 2005, s. 66)

Kiepahduskäyrä	a	b	c	d
Epätarkkuustekijä α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

Kiepahduskäyrä valitaan EN 1993-1-1 standardin sivun 66 suositusten mukaisesti, jotka on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Suositellut kiepahduskäyrät poikkileikkauksen mukaisesti. (SFS-EN 1993-1-1 2005, s. 66)

Poikkileikkaus	Rajat	Kiepahduskäyrä
Valssatut I-profiilit	$h/b \leq 2$	a
	$h/b \geq 2$	b
Hitsatut I-profiilit	$h/b \leq 2$	c
	$h/b \geq 2$	d
Muut profiilit	-	d

Mikäli muunneltu hoikkuus $\bar{\lambda}_{LT} \leq 2$ tai $M_{Ed}/M_{cr} \leq 0,04$, kiepahdusta ei tarvitse tarkistaa. Siinä tapauksessa poikkileikkauksen taivutuskestävyyden tarkastelu riittää.

Poikkileikkauksen ominaisuuksista riippuva kriittinen kiepahdusmomentti M_{cr} lasketaan Rautaruukki Oyj:n Hitsatut profiilit -käsikirjan ohjesääntöjen mukaisesti, sillä menetelmä sopii useille erilaisille, myös uumaltaan tai laipoiltaan hoikille profiileille. Menetelmä on yleinen tapaus, josta saadut tulokset ovat varmalla puolella. Kimmoteorian mukainen kriittinen kiepahdusmomentti M_{cr} lasketaan heikomman pääjähyyksakselin suhteen symmetriselle profiilille seuraavasti, kun sauvaan ei kohdistu primääristä eikä myöskään sekundääristä vääntömomenttia (Rautaruukki Oyj 2010, s. 143):

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 E I_z}{(kL)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_\omega} \right)^2 \cdot \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(kL)^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2} - (C_2 z_g - C_3 z_j) \right] \quad (25)$$

missä C_1 , C_2 ja C_3 ovat vakioita, jotka riippuvat kuormituksesta kuvan 16 mukaisesti.

Kuormitus ja tukiehdot	Taivutusmomenttipinnan muoto	k	Tekijöiden arvot		
			C ₁	C ₂	C ₃
		1,0 0,5	1,132 0,972	0,459 0,304	0,525 0,980
		1,0 0,5	1,285 0,712	1,562 0,652	0,753 1,070
		1,0 0,5	1,365 1,070	0,553 0,432	1,730 3,050
		1,0 0,5	1,565 0,938	1,267 0,715	2,640 4,800
		1,0 0,5	1,046 1,010	0,430 0,410	1,120 1,890

Kuva 16. Kuormitustekijöiden C₁, C₂ ja C₃ arvot, jotka vastaavat tehollisen pituuden kerrointa k. (Rautaruukki Oyj, 2010, s. 145)

I_z on neliömomentti heikomman akselin suhteen, I_t on vääntöneliömomentti, I_ω on käyritysmisjäyhyys, E on kimmokerroin, G on liukukerroin, L on sauvan pituus sivusuunnassa tuettujen kiepahdustukipisteiden välillä, kuvan 16 ja kaavan 25 sisältämät kertoimet k ja k_ω ovat teholliseen pituuteen liittyvät tekijät, jotka valitaan taulukon 6 mukaisesti. Profiilille lasketaan vääntökeskiön ja painopisteen koordinaatit kaavoilla:

$$z_g = z_a - z_s \quad (26)$$

$$z_j = z_s - \frac{0,5 \cdot \int (y^2 - z^2) z dA}{I_y} \quad (27)$$

Poikkileikkauksen vääntöneliömomentti saadaan liitoksen I-palkille kaavasta:

$$I_t = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 b_i t_i^3 \quad (28)$$

z_a on kuorman vaikutuspisteen koordinaatti, z_s on vääntökeskiön eli leikkauskeskiön koordinaatti. Kaavassa 25 oletetaan, että sauvan kumpikin pää on tuettu siten, että sivusiirtymä ja kiertymä pituusakselin suhteen on estetty. Tuentaehtoihin ja kuormitukseen

sisältyvät muut vaikutukset otetaan huomioon kaavassa esiintyvien parametrien k ja k_0 avulla, jotka on esitetty seuraavassa taulukossa. (Rautaruukki Oyj 2010, s. 143-145)

Taulukko 6. Tehollisen pituuden kertoimet eri tuentatapauksille. (Rautaruukki Oyj, 2010, s. 145)

Tuentatapaukset sauvan päissä pysty akselin ympäri tapahtuvan kiertymän suhteen	Poikkipinnan käyrityminen estetty sauvan molemmissa päissä	Poikkipinta voi käyristyä sauvan molemmissa päissä	Poikkipinnan käyrityminen estetty sauvan toisessa päissä, toinen pää voi käyristyä
Kiertymä estetty sauvan molemmissa päissä	$k = 0,5$ $k_0 = 0,5$	$k = 0,5$ $k_0 = 1,0$	$k = 0,5$ $k_0 = 0,7$
Kiertymä vapaa sauvan molemmissa päissä	$k = 1,0$ $k_0 = 0,5$	$k = 1,0$ $k_0 = 1,0$	$k = 1,0$ $k_0 = 0,7$
Kiertymä estetty sauvan toisessa päissä, toinen pää voi kiertyä vapaasti	$k = 0,7$ $k_0 = 0,5$	$k = 0,7$ $k_0 = 1,0$	$k = 0,7$ $k_0 = 0,7$

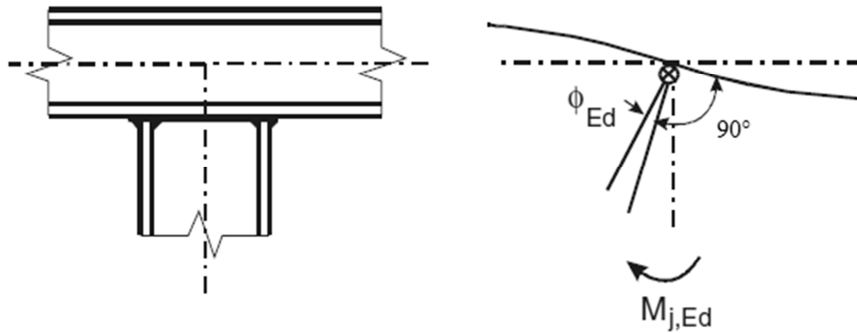
Taulukon parametri k liittyy sauvan pään kiertymiseen asetetussa xy-tasossa ja tekijä k_0 sauvan pään käyristymiseen. Kimmokertoimelle E käytetään materiaalivakiona arvoa $E = 210000 \text{ N/mm}^2$ ja liukukerroin $G = E/2(1 + \nu)$. Poissonin luku eli suppeuskerroin $\nu = 0,3$ kimmoisella alueella. (Rautaruukki Oyj 2010, s. 143)

3.4.7 Liitosten mitoitus

Kannakerakenteen liitokset on suunniteltava siten, että ne täyttävät EN-1993-1-8 sekä EN-1993-1-1 asettamat ehdot. Kriittisiä kohtia liitosten kannalta on erityisesti kannakkeeseen kiinnittyminen teräsrakenteisiin, sillä kannakkeeseen kohdistuvat voimat eivät saa aiheuttaa teräsrakenteisiin minkäänlaista deformaatiota. Teräsrakennesuunnittelu on oma osa-alueensa, jonka rajapinnan yli ei kannakesuunnittelu saa aiheuttaa ylimääristä suunnittelutyötä. Liitokset suunnitellaan standardissa määrätyillä, sisäisten voimien ja momenttien realistista jakautumista koskevien oletusten perusteella siten, että mitoituksen voidaan katsoa olevan turvallisella alueella. (SFS-EN-1993-1-8 2005, s. 20)

3.4.7.1 H- ja I- profiilien väliset rakenneliitokset

Sovelletaan H-I-liitokselle standardin SFS-EN-1993-1-8 kappaleen 6 mukaisia mitoitusmenetelmiä. Menetelmän mukaan liitos mallinnetaan laskennassa peruskomponenttiansa yhdistelmäksi. Liitos voidaan mallintaa kiertymisjousella, joka yhdistää liitettävien sauvojen keskilinjat niiden leikkauspisteessä kuvan 17 mukaisesti.



Kuva 17. Liitoksen momentti-kiertymäyhteyden mitoitusarvo. (SFS-EN 1993-1-8 2005, s. 66)

Kiertymisjousi-mallissa jousen ominaisuudet voidaan esittää momentti-kiertymäominaisuuden mitoitusarvon muodossa, joka kuvaa liitokseen vaikuttavan taivutusmomentin $M_{j,Ed}$ ja liitettävien sauvojen välisen kiertymän ϕ_{Ed} välistä suhdetta.

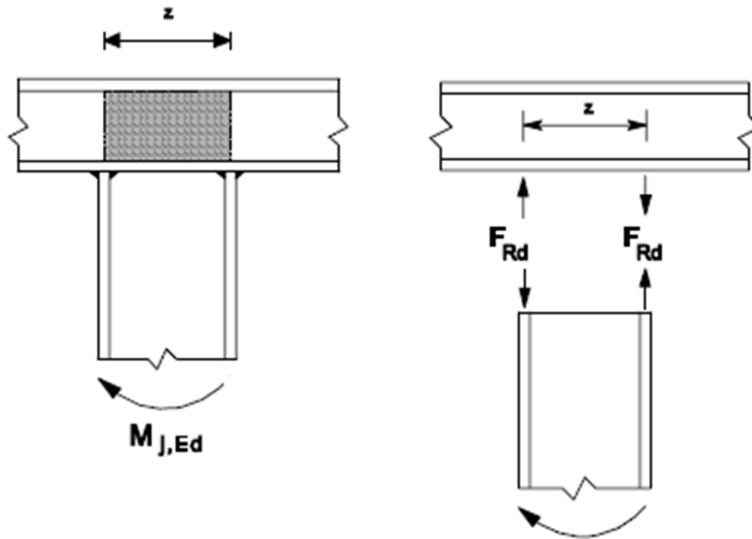
Taivutuskestävyyden mitoitusarvo $M_{j,Rd}$ on yhtä suuri kuin momentti-kiertymäyhteyden mitoitusarvon suurin sallittu arvo. Sen laskukaava esitetään tuonnempana. Liitoksen momentti-kiertymäyhteyden mitoitusarvo riippuu liitoksen peruskomponenteista, joita käytetään yhdessä niihin kuuluvien soveltamissääntöjen kanssa. (SFS-EN 1993-1-8 2005, s. 65-66)

3.4.7.2 I – H -liitoksen soveltamissäännöt

Liitoksessa tarkastellaan ensin teräsrakennepalkin asettamat kestävyys ehdot, jonka jälkeen otetaan huomioon ohjauspalkin tarkastuskohteet. Kannakerakenteen ohjauspalkin sekä teräsrakennepalkin liitoksen ensimmäinen soveltamissääntö on teräsrakennepalkin uuman leikkauksen tarkastus. Säännön mukaan leikkauskestävyyden mitoitusarvo lasketaan kaavasta:

$$V_{wp,Rd} = \frac{0,9f_{y,wc}A_{vc}}{\sqrt{3}\gamma_{M0}} \quad (29)$$

missä A_{vc} on teräsrakennepalkin leikkauspinta-ala ja $f_{y,wc}$ myötölujuus liitoskohdan uuman leikkauksessa. (SFS-EN 1993-1-8 2005, s. 77) Mitoitusarvo kasvaa, mikäli rakenteessa käytetään jäykisteitä tai lisälevyjä palkin uumassa. Yleisesti soveltamissääntöön puitteissa määriteltäjä mitoitusarvoja verrataan kannakerakenteeseen kohdistuvan laskennallisen voiman momentin aiheuttamaan voimapariin liitoksessa.



Kuva 18. Voimien mitoitusarvon jakaantuminen I-H –liitoksessa. (SFS-EN 1993-1-8 2005, s. 93)

Kuva 18 selventää hitsausliitoksessa syntyvää voimien jakaantumista. Momenttivarsi lasketaan kaavasta:

$$z = h - t_{fb} \quad (30)$$

missä h on liittyvän palkin korkeus ja t_{fb} on palkin laipan paksuus.

Toinen soveltamissääntö on palkin uuman poikittainen puristus. Jäykistämättömän palkin uuman kestävyys mitoitusarvo poikittaiselle puristukselle lasketaan seuraavasti:

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{\omega k_{wc} b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} \quad (31)$$

missä $b_{eff,c,wc}$ on palkin puristetun uuman tehollinen leveys, k_{wc} on kestävyys mitoitusarvon pienennystekijä pituussuuntaisen jännityksen vaikutukselle palkin puristetussa uumassa ja ω on pienennystekijä, joka ottaa huomioon uumaan kohdistuvan leikkauksen mahdolliset yhteisvaikutukset taulukon 7 mukaisesti. (SFS-EN 1993-1-8 2005, s. 79)

Taulukko 7. Pienennystekijä ω leikkauksen vaikutuksen huomioon ottamiseksi. (SFS-EN 1993-1-8 2005, s. 80)

Muunnosparametri β	Pienennystekijä ω
$0 \leq \beta \leq 0,5$	$\omega = 1$
$0,5 < \beta < 1$	$\omega = \omega_1 + 2(1 - \beta)(1 - \omega_1)$
$\beta = 1$	$\omega = \omega_1$
$1 < \beta < 2$	$\omega = \omega_1 + (\beta - 1)(\omega_2 - \omega_1)$
$\beta = 2$	$\omega = \omega_2$
$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3(b_{eff,c,wc} t_{wc} / A_{vc})^2}}$	$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + 5,2(b_{eff,c,wc} t_{wc} / A_{vc})^2}}$

Taulukon muunnosparametri β kuvaa leikkauksen rasittaman uuman mahdollista vaikutusta liitoksessa. Puristetun uuman tehollinen leveys hitsatuille kiinnityksille lasketaan kaavasta:

$$b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2}a_b + 5(t_{fc} + s) \quad (32)$$

missä I tai H –muotoisille valssatuille teräsrakennepalkeille t_{fb} on laipan paksuus, a_b on hitsisauman a-mitta, t_{fc} on palkin laipan paksuus, s on palkkiprofiilin muodosta riippuva jännitysjakautumisen mitta. (SFS-EN 1993-1-8 2005, s. 79) Valssatuille I- tai H –profiileille s on palkin nurkkasäde r_c ja t_w on uuman paksuus. Uuman kestävyuden mitoitusarvolle on voimassa seuraava ehto:

$$F_{c,wc,Rd} \leq \frac{\omega k_{wc} \rho b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M1}} \quad (33)$$

missä ρ on levyn lommahduksen huomioon ottava pienennystekijä. (SFS-EN 1993-1-8 2005, s. 79) Se määräytyy levyrakenteen hoikkuuden perusteella, joka puolestaan saadaan laskettua standardin SFS-EN 1993-1-8 sivun 80 mukaan seuraavasti:

$$\bar{\lambda}_p = 0,932 \sqrt{\frac{b_{eff,c,wc} d_{wc} f_{y,wc}}{E t_{wc}^2}} \quad (34)$$

missä I- tai H-muotoisille valssatuille palkeille $d_{wc} = h_c - 2(t_{fc} + r_c)$, missä h_c on uuman korkeus.

kun $\bar{\lambda}_p \leq 0,72$; $\rho = 1,0$

kun $\bar{\lambda}_p > 0,72$; $\rho = (\bar{\lambda}_p - 0,2) / \bar{\lambda}_p^2$

Kolmas tarkastelukohde on teräsrakennepalkin uuman poikittainen veto. Palkin jäykistämättömän uuman kestävyysmitoitussarvo poikittaisessa vedossa lasketaan kaavasta:

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega b_{eff,t,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} \quad (35)$$

Hitsatuissa kiinnityksissä teräsrakennepalkin vedetyn uuman tehollinen leveys lasketaan kaavasta 31. (SFS-EN 1993-1-8 2005, s. 82) Neljäs ja viimeinen teräsrakennepalkin peruskomponentti ja tarkastelukohde on sen laipan taivutus. Hitsatuissa liitoksissa jäykistämättömän palkin laipan kestävyysmitoitussarvo poikittaisessa taivutuksessa lasketaan standardin SFS-EN 1993-1-8 sivun 86 mukaisesti kaavasta:

$$F_{fc,Rd} = b_{eff,b,fc} t_{fb} f_{y,fb} / \gamma_{M0} \quad (36)$$

missä tehollinen leveys $b_{eff,b,fc}$ on tässä murtumistarkastelussa:

$$b_{eff,b,fc} = t_w + 2s + 7kt_f \quad (37)$$

missä $s = r$ ja

$$k = (t_f/t_p)(f_{y,f}/f_{y,p}), \text{ mutta } k \leq 1 \text{ (SFS-EN 1993-1-8 2005, s. 50)}$$

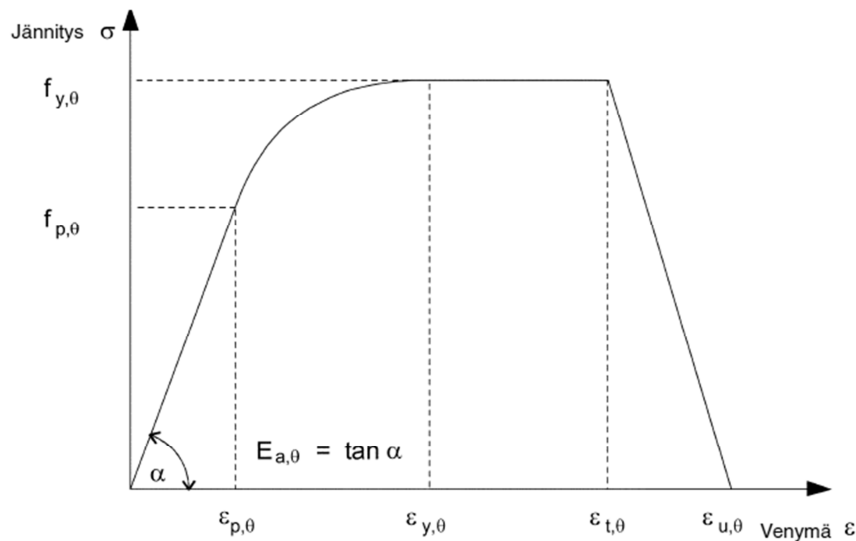
Ohjauspalkin puolelta tärkein tarkastelukohde on laipan ja uuman puristus. Palkin laipan ja sen viereisen palkin uuman puristustetun osan puristuskestävyyden mitoitussarvon resultantin voidaan olettaa vaikuttavan puristuskeskiössä. Kiinnityksessä ei ole mukana ruuveja eikä vetokestävyyttä tarvitse rakenteen puitteissa tarkastella. Tällöin puristuskestävyyden mitoitussarvo lasketaan kaavasta:

$$F_{c,fb,Rd} = M_{c,Rd} / (h - t_{fb}) \quad (38)$$

missä h on liittyvän ohjauspalkin korkeus, $M_{c,Rd}$ on palkin poikkileikkauksen taivutuskestävyyden mitoitussarvo ja t_{fb} on liittyvän palkin laipan paksuus. (SFS-EN 1993-1-8 2005, s. 89)

3.4.8 Lämpötilan vaikutus

Lämpötilan noustessa teräksen lujuus ja kimmokerroin pienenevät. Teräksen lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet korkeissa lämpötiloissa ilmoitetaan Suomen Standardoimisliiton teräsrakenteiden palomitoitusstandardissa. Rakenteellinen palomitoitus ei suoranaisesti ole kannakointiin liittyvä osa-alue, mutta lämpötilan vaikutus teräksen lujuus- ja kimmo-ominaisuuksiin voidaan katsoa olevan yhtäläistä. Teräksen jännitys-venymäyhteys korkeissa lämpötiloissa on esitetty kuvassa 19.



Kuva 19. Teräksen jännitys-venymäkäyrä korkeissa lämpötiloissa. (SFS EN 1993-1-2 2005, s. 21)

Kuvan mukaista jännitys-venymäyhteyttä käytetään määrittäessä veto-, puristus-, momentti- tai leikkauskestävyyksiä korkeissa lämpötiloissa. Standardin säännöissä oletetaan, että teräksen lämpenemisnopeus on 2...50 K minuutissa. Kuvassa esiintyvät termit:

$f_{y,\theta}$	tehollinen myötöraja normaalilämpötilamitoituksessa
$f_{p,\theta}$	suhteellisuusraja normaalilämpötilamitoituksessa
$E_{a,\theta}$	kimmomoduuli korkeassa lämpötilassa
$\epsilon_{p,\theta}$	suhteellisuusrajaa vastaava venymä normaalilämpötilamitoituksessa
$\epsilon_{y,\theta}$	myötövenymä normaalilämpötilamitoituksessa
$\epsilon_{t,\theta}$	myötörajaa vastaavan venymän yläraja normaalilämpötilamitoituksessa
$\epsilon_{u,\theta}$	murtovenymä normaalilämpötilamitoituksessa

Teräksen lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien muuttumista lämpötilan kasvaessa kuvataan seuraavilla pienennystekijöillä. Tehollinen myötöraja määritetään kertoimella $k_{y,\theta}$. Laskelmissa käytetään tätä arvoa ja se vastaa muodonmuutosta $\epsilon_{y,\theta}$. Kertoimella $k_{p,\theta}$ määritetään suhteellisuusraja, jota suuremmilla jännityksen arvoilla teräkseen jää pysyviä muodonmuutoksia kuormituksen poistamisen jälkeen. Kertoimella $k_{E,\theta}$ määritetään kimmomoduuli suunnittelulämpötilassa. (Rautaruukki Oyj 2010, s. 481)

Taulukko 8. Hiiliteräksen jännitys-venymäyhteyden pienennystekijät korkeissa lämpötiloissa. (SFS EN 1993-1-2 2005, s. 22)

Teräksen lämpötila θ_a (°C)	Tehollisen myötörajan pienennystekijä $k_{y,\theta}$ suhteessa arvoon f_y	Suhteellisuusrajan pienennystekijä $k_{p,\theta}$ suhteessa arvoon f_y	Kimmokertoimen pienennystekijä $k_{E,\theta}$ suhteessa arvoon E_a
20	1,000	1,000	1,000
100	1,000	1,000	1,000
200	1,000	0,807	0,900
300	1,000	0,613	0,800
400	1,000	0,420	0,700
500	0,780	0,360	0,600
600	0,470	0,180	0,310
700	0,230	0,075	0,130
800	0,110	0,050	0,090
900	0,060	0,0375	0,0675
1000	0,040	0,0250	0,0450
1100	0,020	0,0125	0,0225
1200	0,000	0,0000	0,0000

Taulukossa 7 on esitetty pienennystekijät lämpötilassa θ_a suhteessa 20 °C lämpötilaa vastaaviin arvoihin f_y tai E_a . Väliarvot lämpötilan suhteen saadaan lineaarista interpolointia käyttäen. Pienennystekijät voidaan esittää kaavoin seuraavasti. Tehollinen myötöraja suhteessa myötörajaan 20 °C lämpötilassa:

$$k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y \quad (39)$$

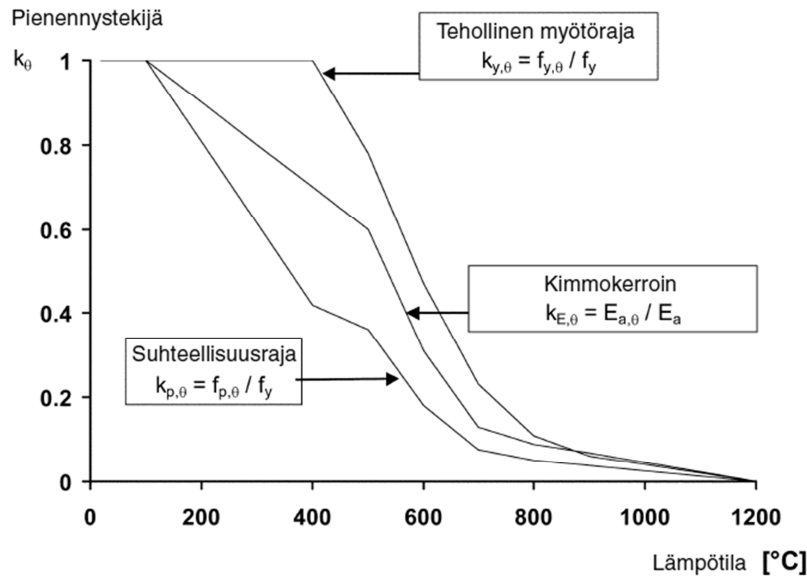
Suhteellisuusraja suhteessa myötörajaan 20 °C lämpötilassa:

$$k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y \quad (40)$$

Kimmokerroin suhteessa myötörajaan 20 °C lämpötilassa:

$$k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a \quad (41)$$

Näiden tekijöiden muuttuminen lämpötilan funktiona esitetään kuvassa 20.



Kuva 20. Pienennystekijät hiiliteräksen jännitys-venymäyhteydelle korkeissa lämpötiloissa. (SFS EN 1993-1-2 2005, s. 22)

Kuvista 19 ja 20 nähdään, että teräksen lujuus pienenee lämpötilan ylittäessä 400 celsiusastetta. Teräksen kimmokerroin pienenee jo lämpötilan noustessa 100 celsiusasteen yläpuolelle.

3.5 Ohjauspalojen hitsausmitoitus

Ohjauspalat ja niiden kiinnitys suunnitellaan siten, että kanavan lämpöliike ei haittaa kanavan ohjauselementtien toimintaa. Ohjauspalojen on oltava riittävän pitkiä, jotta kanava pääsee liikkumaan vapaasti pysyen samalla hallinnassa. Kiinnitys kanavan jäykistekehään tapahtuu pienahitsillä. Hitsin kestävyys voidaan olettaa riittäväksi, mikäli hitsin jokaisessa pisteessä sen pituudella hitsiin kohdistuva kaikkien voimien resultantti yksikköpituutta kohti täyttää ehdon:

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd} \quad (42)$$

missä $F_{w,Ed}$ on hitsin pituusyksikköä kohti vaikuttavan voiman mitoitusarvo ja $F_{w,Rd}$ on hitsin kestävyysmitoitusarvo pituusyksikköä kohti. (SFS-EN 1993-1-8 2005, s. 47)

Riippumatta hitsin laskentapoikkipinnan suunnasta hitsin kestävyysmitoitusarvo pituusyksikköä kohti lasketaan seuraavasti:

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a \quad (43)$$

missä $f_{vw,d}$ on hitsin leikkauslujuuden mitoitusarvo ja a hitsin a -mitta. Hitsisauman leikkauslujuuden mitoitusarvo lasketaan kaavasta:

$$f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad (44)$$

missä f_u on heikomman liitettävän osan vetomurtolujuuden nimellisarvo ja β_w on pienahitsin teräslajista riippuva korrelaatiokerroin. (SFS-EN 1993-1-8 2005, s. 46-47; Järvelä et al. 2006, s. 70)

Kahden ohjauslevykorvakkeen hitseissä vaikuttavan vaakasuuntaisen ja keskitetyn tilanteen voimakomponentin mitoitusarvo hitsin yksikköpituutta kohden määritetään kaavasta:

$$F_{w,Ed1} = F_{Ed} / 2 \cdot l \quad (45)$$

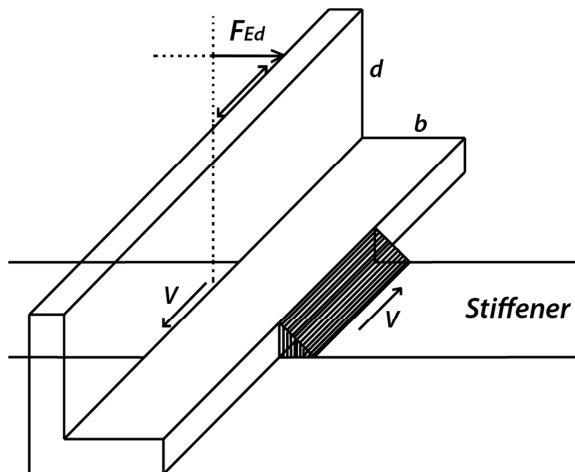
missä l on hitsisauman pituus. (Järvelä et al. 2006, s. 70) Ohjauspalojen muodosta sekä siihen kohdistuvasta voimasta saadaan laskettua levyn geometrian momenttitasapaino sekä siitä seuraava viivakuorma hitsisaumassa. Tämä momenttitasapainosta seuraava viivakuorma on ohjauspalaan kohdistuvan resultanttivoiman toinen voimakomponentti.

$$F_{w,Ed2} = N_y / l \quad (46)$$

missä N_y on momenttitasapainosta laskettu tukivoima ohjauspalan alapinnassa. Resultanttivoiman kolmas voimakomponentti on lämpöliikkeestä aiheutuva viivakuorma hitsissä. Tällöin momenttivartena käytetään pahimman tapauksen mukaista lämpöliikkeen maksimipituutta. Kuormitusmomentti jaetaan ohjauslevyn tehollisella leveydellä ja siitä saatava viivakuorma jaetaan voiman vaikutuspisteen etäisyydellä hitsisaumasta.

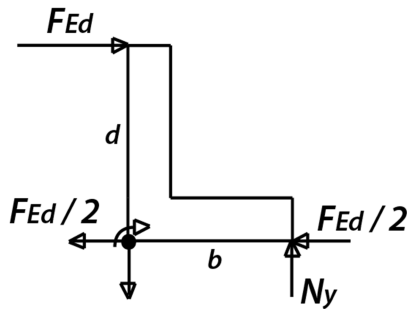
$$F_{w,Ed3} = V / l \quad (47)$$

Ohjauspalan geometria ja edellä esitettyjen kaavojen voimasuureet on esitetty kuvissa 21 ja 22:



Kuva 21. Ohjauspalan ja jäykistekehän kiinnityskohta. (Adobe Illustrator CS6)

Hitsisauma toteutetaan jatkuvana hitsinä koko jäykistekehän leveydeltä. Kuormitusvoiman F_{Ed} oletetaan kohdistuvan aivan levyn yläpintaan, jolloin laskennallinen tarkastelu on konservatiivisempi. Todellisessa tilanteessa voima kohdistuu selvästi alemmas levyn ohjauspintaa jolloin momenttivaikutuskin pienenee.



Kuva 22. Ohjauspalkan päädyn momenttitarkastelu. (Adobe Illustrator CS6)

Voimakomponenttien resultantti yksikköpituutta kohden saadaan laskettua kolmiulotteisessa avaruudessa trigonometrisesti käyttäen suunnikassääntöä sekä kaavoja 45-47:

$$F_{w,Ed} = \sqrt{F_{w,Ed1}^2 + F_{w,Ed2}^2 + F_{w,Ed3}^2} \quad (48)$$

Kaavasta 48 laskettua resultanttivoimaa yksikköpituutta kohden käytetään kuormana ohjauspalakorvakkeen mitoituksessa.

3.5.1 Ripustustankojen kiinnitykset

Kannakerakenteen ripustustangot kiinnittyvät palkkiprofiilien laippoihin joko uuman suuntaisesti tai sitä vastaan kohtisuorasti. Tilanteista uumaa vastaan kohtisuora kiinnitystapa on jännitysjaakumaltaan epävakampi, joten kiinnitys on mitoitettava sen mukaisesti.

Kyseessä olevan palkin jäykistämättömän uuman kestävyysmitoitussarvo saadaan laskettua kaavoista 32 ja 35 sekä kyseessä olevan palkin jäykistämättömän laipan kestävyysmitoitussarvo saadaan laskettua kaavoista 36 ja 37.

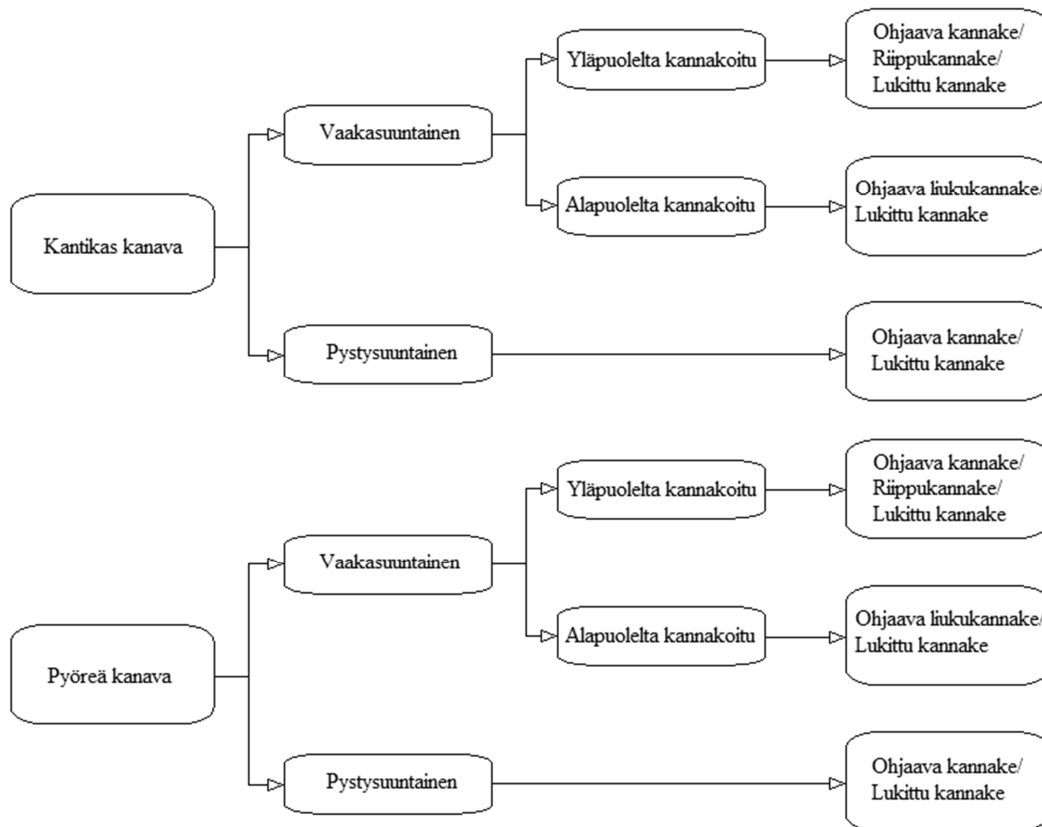
4 KONSEPTISUUNNITTELU

Tässä kappaleessa analysoidaan kannakekonsepteja ja luodaan suunta yhtenäisemmälle kannakerakennekirjastolle. Kappale kyseenalaistaa nykyisiä käytäntöjä ja ratkaisuja sekä pohtii niiden pohjalta uusia kannakointikeinoja. Tavoitteena on luoda ensin ylätasoon kannakejärjestelmä, johon kehitetään konseptit jokaisesta työn kehityskohteesta. Muodostuneille pääkannakkeille tehdään tarkempi detaljisuunnittelu, jonka tuloksia voidaan jatkaa myös muille kannaketyypeille.

Moduloinnin periaatteiden mukaan suunnittelijan tulisi käyttää teknisesti parasta samantyyppisten moduulien yhdistelmää. Käytännössä kuitenkin erityyppisten moduulien ja asiakaskohtaisten tai layoutista riippuvien syiden takia epämoduulien käyttö on usein välttämätöntä ja tämä johtaa tapauskohtaiseen tarkasteluun. Mikäli harvoin tarvittavien vaihtoehtojen toteuttaminen lisää kokonaiskustannuksia, niitä on pyrittävä karsimaan mahdollisuuksien mukaan. Tyydyttävä ratkaisu on myös puolivalmis moduulirakenne, jota eri alikokoonpanoin täydentämällä voidaan käyttää useaan eri toimintoon. Tätä periaatetta käytetään myös tämän työn kannakesuunnittelussa. Tämän luvun päätöksiin ovat vaikuttaneet palaverit kannakkeiden kanssa työskennelleiden asiantuntijoiden kanssa.

4.1 Lähtökohdat

Ongelma rajattiin lähtökohtaisesti useasti toistuviin kannakointikohteisiin, niin sanottuihin perustilanteisiin. Kanavakannakkeet jaetaan yleisesti kanavan muodon, suunnan ja kannakointimenetelmän mukaisesti. Valmet Power Oy:n kannakeratkaisuista kehitystä on katsottu vaativan yläpuolelta kannakoitu kantikas vaakakanava, alapuolelta kannakoitu kantikas vaakakanava, yläpuolelta kannakoitu pyöreä vaakakanava, alapuolelta kannakoitu pyöreä vaakakanava, kantikkaan pystykanavan kannakkeet sekä pyöreän pystykanavan kannakkeet. Variaatioina näille on konseptitasolla esitettävä ohjaava kannake, lukittu kannake sekä riippuvien kannakkeiden osalta vapaa ripustus. Perustapauksen jaotteluperiaate on esitetty kuvassa 21.



Kuva 23. Lähtökohtainen kannakevariaatioiden jaottelu.

Tämä jaottelumalli toimii perustana kannakejärjestelmän luomiselle. Tavoitetilanteessa edellä nimetyt kannaketyypit on saatettu periaatekuvina Valmetin kanavasuunnitteluohjeeseen sekä yhtenäiseksi kirjastoksi joko ohjekuvina tai PDMS –järjestelmän osakomponentteina.

Tämän työn puitteissa keskittyminen kohdistuu alustamaan tätä tavoitetta luomalla taulukkomuotoisen suunnitteluohjeistuksen, laskentapohjan, joka säästää suunnittelutyöhön käytettyjä tunteja. Järjestelmällisen kannakoinnin ohje antaa selkeät reunaehdot, joten se myös helpottaa suunnittelutyötä ja yhtenäistää ratkaisuja.

4.1.1 Top-down approach

Järjestelmän konseptia tarkasteltiin Valmet Powerin vaatimukset mielessä pitäen. Ylimpänä vaatimuksena on, että tämän työn pohjalta suunnittelutyötä voidaan jatkaa muille kannakkeille, jotka vaativat kehitystä, mutta joita tässä työssä vain sivutaan. Palaverissa sekä PDMS –mallien tutkimustyössä kävi ilmi, että kehitystä eniten vaativa kannaketyyppi on yläpuolisesta tasosta kannakoitu kantikas vaakakanava.

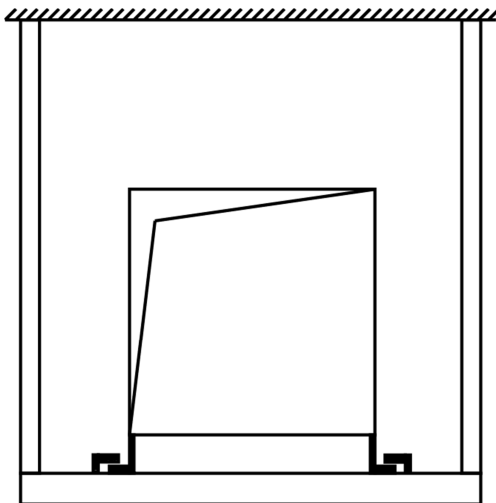
Kantikas vaakakanava on laitoksissa hyvin usein käytetty ratkaisu liityntämahdollisuuksiensa, tilavarauksen ja layoutin rajoitteiden takia. Kannakevaihtoehto on yleisyydellään avainasemassa suunnittelutyön helpottamisessa ja turhan työmäärän vähentämisessä. Toimenpiteillä on siis suoraa vaikutusta myös kustannuksiin.

Järjestelmän luonnin kannalta valitsin edellä mainitun kannakkeen olennaiseksi kannaketyypiksi edellä mainituista syistä. Tässä diplomityössä keskittyminen ohjautuu

kyseiseen pääkannakkeeseen, jonka periaatteita mukaillen järjestelmä voidaan laajentaa kattamaan kaikki kehitystä vaativat kannaketyypit. Menetelmää voisi ajatella ylhäältä alaspäin virtaavana top-down approach -lähestymistapana, jossa ensin muodostetaan laajempi käsitys kohteista, sitten tiivistetään näkemystä olemassa olevan tiedon perusteella keskittymällä tarkemmin yhteen järjestelmän yksityiskohtaan ja sen alikokoonpanoihin.

Yläpuolisesta tasosta kannakoitu kantikas vaakakanava voidaan kannakoida usealla eri tavalla. Ratkaisujen paremmuutta on joissain tapauksissa vaikea määritellä, sillä käypiä ratkaisuja on todella monta. Paremmuusvertailuun liittyy suurena osana eri lujuusopillisten parametrien kriittisyys käyttökohteessa. Esimerkiksi kitka, massa, eristettyvyys ja lämpöliikkeet ottavat kantaa designiin kukin parametri omalla painoarvolla. Se, minkä määrätään olevan kriittisintä määrää suurelta osin myös olennaisen kannakkeen designin.

Seuraavat luonnokset ovat osa suurempaa määrää liukukannakevaihtoehtoja, joita suunnittelin konseptointivaiheen alussa. Jokaisen konseptin tavoitteena on kattaa sama toiminto, sallia jäykkänä rakenteena kanavan liike pitkittäissuunnassa. Luonnosten esitysjärjestys näyttää konseptisuunnittelutyön kriittisimmät välivaiheet. Kuvat havainnollistavat sitä, että vaikka toimivia ratkaisuja on useita, niin vasta tarkempi pohdinta osoittaa eri parametrien tärkeysjärjestyksen. Konsepteista heränneet huomiot ja näkökohdat perustuvat palavereihin ja keskusteluihin, joita kävin kokeneiden kanavasuunnittelijoiden kanssa työn edetessä.

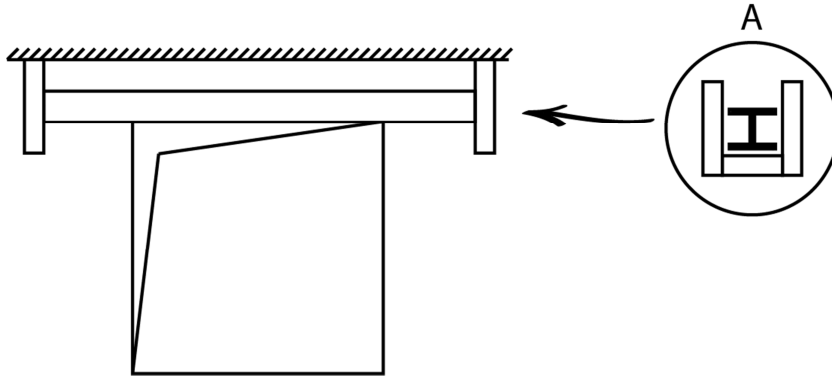


Kuva 24. Kannakkeen konseptivaihtoehto 1. (Adobe Illustrator CS6)

Kuvassa 24 on esitettyä leikkauskuvana eräs idea kannakoida kantikas vaakakanava yläpuolisesta tasosta. Kanavan ympärille konstruoidaan teräsrakenneportti ja kanava tuetaan alapuolelta liukukynsin. Suoraa yläpuoleista kiinnitystä vältetään ja kannaketyypistä muodostetaan alta kannakoitu liuku. Asennuksen kannalta ratkaisuidea on hyvä. Kanava voidaan nostaa taljoilla haluttuun korkeuteen, ja ympärille voidaan sen jälkeen rakentaa portti. Tässä konseptissa tosin suurimmaksi haittapuoleksi nousee kyn-

siohjaimien kitka. Toinen näkökohta on eristettävyys, jätetäänkö kynnet pois kuumati-
lasta vai ei. Näistä syistä idea ei ole valmis konseptivaihtoehdoksi.

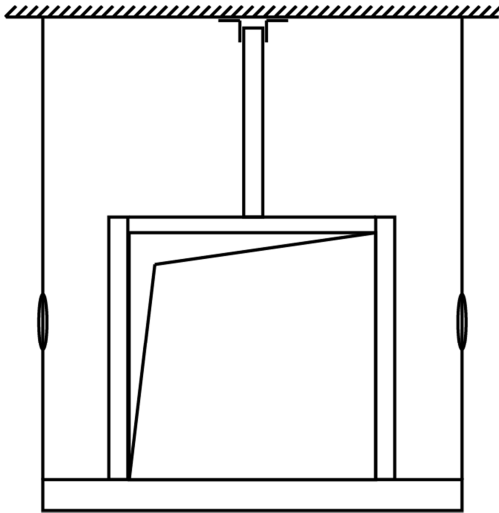
Toisessa konsepti-ideassa (kuva 25) hylättiin porttimainen alapuolinen kannakointi. Suositetaan yksinkertaisuutta ja hitsataan kanava katostaan kiinni yläpuoliseen poikki-
palkkiin, ja palkki liukuu pienten ulokeporttien varassa palkin päädyn leikkauskuvan A
mukaisesti.



Kuva 25. Kannakekonseptivaihtoehto 2. (Adobe Illustrator CS6)

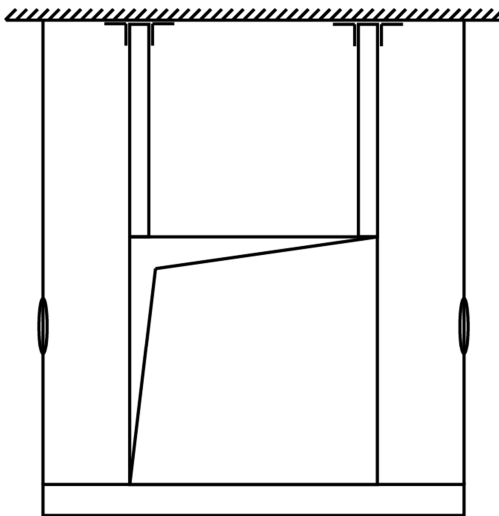
Rakenteen liukutoiminto siirrettiin siis ideassa 2 alapuolelta kanavan päälle. Idea oli kompakti ja kiinnostava, mutta kanavan riiputus hitsisaumasta ei ole yhtä hyvä ratkaisu kuin tuenta alapuolelta. Hitsisauma kyllä todennäköisesti kestäisi perustilanteen mukai-
sen rasituksen, mutta tilanne ei ole millään muotoa optimi. Asennuksen kannalta ratkai-
su on myös ongelmallinen. Kanavan saaminen haluttuun korkeuteen hankaloituu. Suu-
rimmaksi haittapuoleksi konseptissa 2 muodostui modulaarisuuden puuttuminen. Rat-
kaisuun ei käy jousikannakkeet tai vakiovoimakannakkeet ilman suuria muutoksia, sillä
ne vaativat riippuvan ripustuksen jotta jouset voivat venymällä kompensoida pystysuun-
taisia voimia.

Kolmannessa konseptissa (kuva 26) edellä mainitut ominaisuudet on huomioitu. Alapuolelta tuettu kanava riippuu tankojen varassa, jotka voidaan säätää vanttiruuvein
halutulle korkeudelle. Liike otetaan huomioon kanavan yläpuoliselta pinnalta nostetulla
tangolla, jonka yläpuoleinen pää on L-rautojen välissä. L-raudat ja pystypalkki ohjaavat
kanavan liikesuuntaa tankojen ottaessa kuorman vastaan. Kitkaa ei käytännössä synny
ollenkaan, sillä kuorma ei lepää ohjaavan elementin päällä. Ratkaisuun sopivat myös
jousikannakkeet ja vakiovoimakannakeosat palkin pituutta muuttamalla ja tanko-
osia vaihtamalla. Kanavan ympärillä on jäykisteportti, joka jäykistää kanavaa sekä toimii
kannakkeen kannakointirakenteen osana.



Kuva 26. Kannakevaihtoehto 3. (Adobe Illustrator CS6)

Mahdolliseksi ongelmaksi muodostuvat kuitenkin ratkaisun ja käyttökohteen globaalit näkökohdat. Esimerkiksi maanjäristystilanteessa sivusuuntaiset voimat ja keskelle sijoitettun ohjauspalkin korkea nivelpiste saattavat vääntää kanavaa ja tankoja sivuttain. Tästä syystä vaaditaan ratkaisulle tehostetumpi ohjaus.



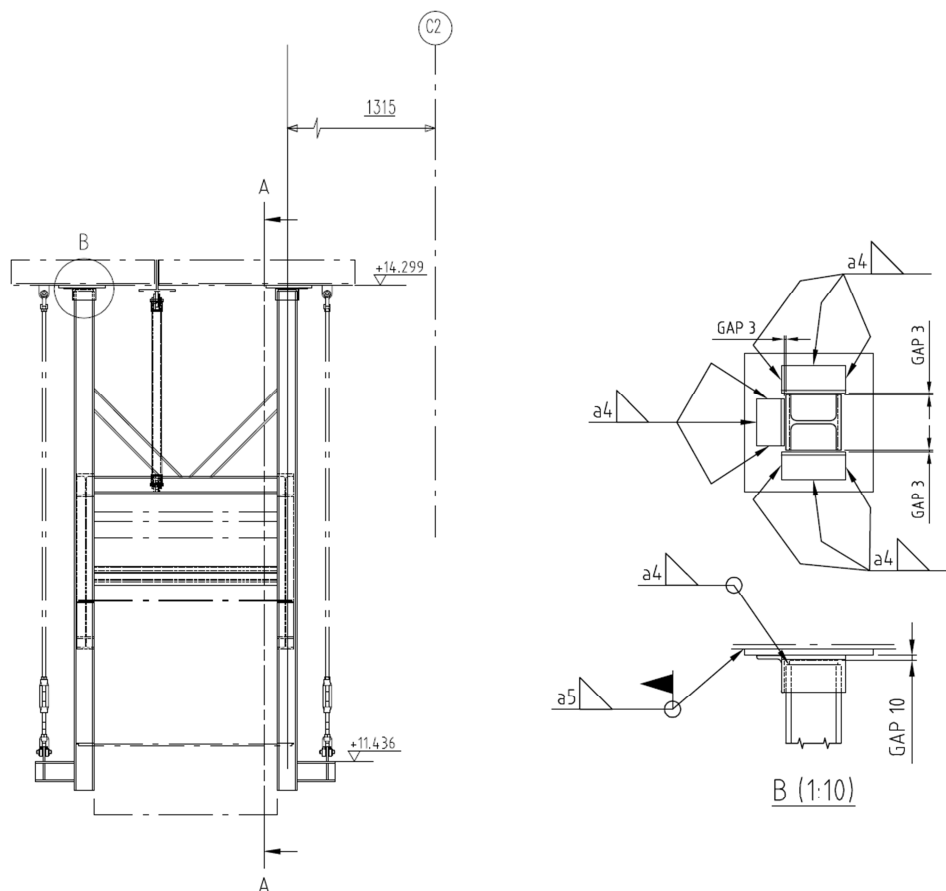
Kuva 27. Kannakevaihtoehto 4. (Adobe Illustrator CS6)

Kuvan 27 mukaisessa jatkokonseptissa on pohdittu ohjaus uudelleen sekä kyseenalaistettu jäykisteportin tarkoitus. Ohjausta on tässä mallissa tehostettu toisella palkilla, ja palkit ovat symmetrisesti kanavan yläpinnan sivuilla. Jäykisteportti on jätetty pohdintaan, sillä se kasvattaa kanavakannakkeen kokonaismassaa. Tämä konsepti valittiin lähtökohtaiseksi kehitysideaksi, sillä se tarjoaa vastauksia yleisimmille suunnittelun ongelmille kuten kitkavoimat, asennettavuus, globaali käyttö sekä vakiointi. Seuraavassa alaluvussa tarkastellaan konseptin luontia eritoten vakioinnin ja modulaarisuuden periaatteiden valossa.

4.1.2 Modulaarisuus konseptissa

Kanavakannakkeesta voidaan erottaa erilaisia rajapintoja. Sen pääasiallinen tehtävä kokoonpanona on kannattaa ja suojata kanavia sekä niihin liittyviä laitteita ja varusteita. Lisäksi sen on otettava vastaan tai ohjattava kanavan liikkeitä sekä siihen kohdistuvat voimat oikeaan suuntaan, useimmiten ympäröiviin rakenteisiin. Konseptisuunnittelussa hyödynnettävä modulaarisuus toteutetaan kannakkeen teknisessä järjestelmässä, mutta sen tavoitteet ovat liiketoiminnalliset, sillä yhtenäisempi tuoterakenneratkaisu tuo mukanaan säästöjä ja uskottavuutta. Kannakkeiden modulointi ei kuitenkaan ole toteutuksen vakiointia. Tavoitteena on pikemminkin rajapintojen ja uuden ajattelutavan vakiointi, sillä kannakkeita on yhtä monta kuin on eri käyttökohteitakin.

Erotetaan kannakkeesta kaksi osajärjestelmää: Ohjausosat ja kannakoivat osat. Ohjausosat käsittelevät kanavan liikkeen ja sallitut liikesuunnat. Ne pitävät huolen siitä, että voimat kohdistuvat oikeaan suuntaan ja liike on hallittua kaikissa olosuhteissa. Vapausasteiden hallinnan lisäksi toinen osajärjestelmä on kannakoivat osat. Kannakoivat osat hoitavat kanavan pääasiallisen tarkoituksen, kanavan kannatuksen kaikissa olosuhteissa. Niiden on oltava rakenteeltaan lujia ja kestävä kuormat, joille ne altistetaan. Havainnollistetaan ideaa rajauksella Valmetin erään projektin työkuvausta.



Kuva 28. Yläpuolisesta tasosta kannakoitu kantikas vaakakanava, lukittu kannake. (Valmet Power Oy)

Vasemmanpuoleisesta rajauksesta nähdään kuinka pistekatkoviivoin merkitty kantas kanava on kannakoitu yläpuoleiseen palkkirakenteeseen pitkin tangoin. Kannake on sijoitettu kanavamutkan jälkeiseen osaan, paikkaan jossa kanava taivutuu pystysuuntaisesta vaakasuuntaiseksi. Valitsin esimerkkitalanteeksi tämän työkuvaan siksi, että kannakerakenne on melko samanlainen kuin konseptipalavereissa muotoutuneet ideat, mutta sen lisäksi esimerkissä on tilannekohtaisia parametreja.

Vapausasteet on rajoitettu kiinnittämällä ylätasoon L-rautoja, joiden sisäpuoleista pintaa vasten kohotetaan kanavan kylkiä pitkin ohjauspalkit. Rautojen ja palkin väliin jätetään 3mm liikkumavara, kuten leikkauksesta B nähdään. Lisäksi ylätasoon jätetään 10mm vällys. Liike on siis käytännössä lukittu vaikka pientä laajenemisvaraa ratkaisussa sallitaankin. Laajenemisvara on hyvä ottaa lämpötilanmuutoksissa huomioon, sillä lämpöpitenevä ohjausosissa tai kanavan liike saattavat aiheuttaa hankausvoimia. Kuvan 28 ratkaisuun on lisäksi päätetty lisätä tuentaa kanavan suuntaisella vinotuennalla sekä kanavan päälle sijoitetuin vinoin kannakepalkkiprofiilein.

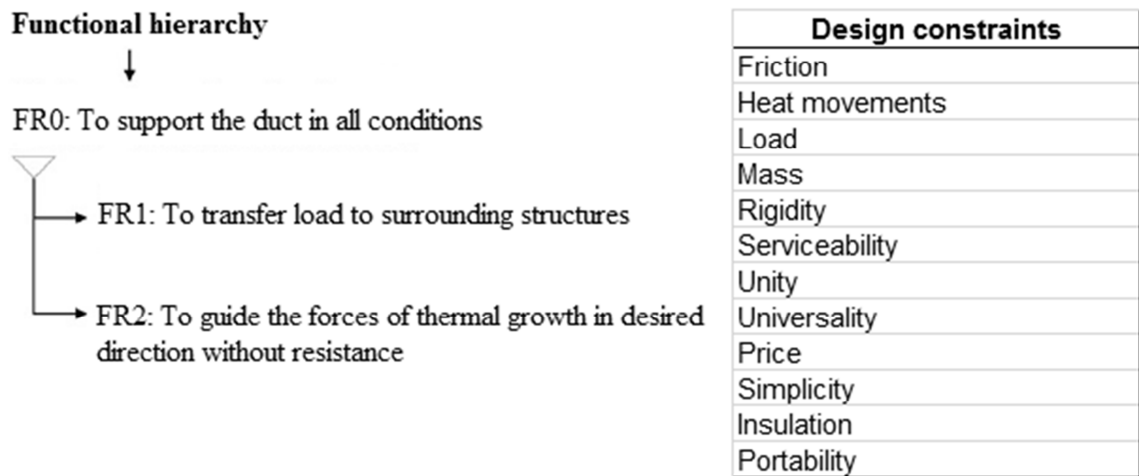
Yllä oleva esimerkki havainnollistaa sitä, kuinka kannakoinnin perustana on usein laskentaan ja vaikuttaviin parametreihin perustuva näkemys. Toimiva osajärjestelmä voidaan toteuttaa usealla tavalla. Perusteltuun lopputulokseen vaikuttaa kanavassa tapahtuvat ilmiöt, mutta niiden huomioonottaminen ei ole vakioitua. Mikäli katsomme kannaketta modulaarisuuden ehdoilla, niin kannakkeen ensisijaisina tukiosina toimivat tangot, jotka kannattelevat kanavan sekä kannakkeen aiheuttamaa kuormaa. Ohjausosina toimivat pystypalkit, jotka rajoittavat liikettä joka suuntaan ja lukitsevat kanavan sallittujen välysten ehdoilla kohdalleen. Näiden asioiden merkityksellisiä ominaisuuksia pohditaan seuraavassa kappaleessa.

4.2 DFM soveltaminen ja modulaarinen perustelu suunnittelussa

Tutkitaan kannakkeen pääfunktioita, eli sitä, miten sen tulisi toimia. Kannakekandidaatin kilpailukyvyyn määrittää se, kuinka hyvin se toteuttaa sille asetetut vaatimukset. Optimaalisen ratkaisun tulee ottaa huomioon lujustechniset parametrit sekä nojattava myös tiukasti esimerkiksi asennettavuuteen ja kustannustehokkuuteen. Tärkeimpinä suunnittelurajoitteina kannakkeelle toimii kitka, lämpöliikkeet, kuorma, kanavan massa, rakenteellinen jäykkyys, huollettavuus, asennettavuus, kannakkeiden välinen yhtenäisyys, globaalisuus, hinta, yksinkertaisuus, eristettävyyys sekä kuljetettavuus. Näiden yhteisvaikutuksesta luotava kannake on asiakkaalle kiistatta kaikkein hyödyllisin.

Jatketaan DFM:n soveltamista ja jaetaan kannake osatoiminnoikseen. Konseptin fyysinen olemus häviää ja keskitytään vain tuotekehityksen tavoitteisiin. Menetelmä kirkastaa tutkimuksen tavoitetta sitomatta sitä olemassa oleviin detaljeihin. (Ferrer et al. 2009, s. 424-425) Tavoitteena on päästä kuvailtuun toiminnallisuuteen parhaalla mahdollisella tavalla ilman ennakkokäsityksiä siitä, millainen suunnittelun lopputulos voisi

olla. Funktionaalinen hierarkiakaavio sekä kannakesuunnittelun rajaava vaatimuslista ovat esitettynä alla.



Kuva 29. Kannakkeen päätoimintojen hierarkiakaavio sekä suunnittelun rajoitteet.

Kuvassa vasemmalla puolella on esitettynä funktiohierarkia, jossa toimintopuun ylimpänä haarana on kannakkeen päätoiminto nimettynä funktiorajoitteeksi 0 (FR0). Tämä on perustava vaatimus kannakkeen toiminnalle. Sen alle voidaan lisätä toissijaisia toimintorajoitteita, jotka kuvassa on nimetty tunnuksilla FR1 ja FR2. Toissijaiset toiminnot kuvaavat niitä ominaisuuksia, joita vaaditaan päätoiminnon saavuttamiseksi, mutta ei itsessään vielä ole lopullinen tavoite. (Ferrer et al. 2009, s. 424-425)

Oikealla puolella kuvassa on listattuna suunnittelun rajoitteet, vaatimuslista, jota on noudatettava parhaan mahdollisen ratkaisun suunnittelussa. Kanavakannakkeelle on annettu yksitoista vaatimusta. Lista on verrattain pitkä tämän kaltaiselle tuotekehitysprojektille, joten sitä on jaoteltava lisää ja annettava parametreille arvot. Kuva kertoo myös ongelman laajuudesta, ja näyttää esimerkkiä siitä, miksi kannakointi on niin suunnittelijaorientoitunutta työtä.

Jaetaan vaatimuslistan rajoitteet edellisessä kappaleessa määritellyille osajärjestelmille taulukkoon 9. Kannakoivat osat ottavat vastaan kuorman, huomioivat kanavan ja kannakkeen massan ja jäykkyyden. Ohjausosat huomioivat kitkavoimat sekä lämpöliikkeet. Listan muut parametrit otetaan huomioon järjestelmien yhteisvaikutuksesta, ja nimitetään tätä järjestelmää yhteisjärjestelmäksi.

Taulukko 9. *Suunnitteluparametrit kannakkeen osajärjestelmille.*

Guide system	Support system	Mutual system
Friction Heat movements	Load Mass Rigidity	Serviceability Unity Universality Price Simplicity Insulation Portability

Järjestelmien täytyy ratkaista niille suunnatut ongelmat. Yhteisjärjestelmän vaikutus on siis oltava sellainen, että se ottaa huomioon parhaalla mahdollisella tavalla ne parametrit, joita yksittäinen osajärjestelmä ei kykene hoitamaan. Osajärjestelmien ja vaatimuslistojen pohjalta luodaan seuraavassa luvussa DFM -ideat. Ideoiden tulee ottaa kantaa siihen, kuinka funktion ongelma ratkaistaan käytännön menetelmin sekä millä keinoin otetaan huomioon vaaditut rajoitteet.

4.3 Konseptikandidaatin valinta

Keskustelut Valmet Power Oy:n asennuspäällikön, kanavasuunnittelijan sekä huollon edustajan kanssa valaisivat funktiorajoitteiden toteutusta omien ideoideni pohjalta. Näkemysten pohjalta karsin konsepti-ideat muutamaaan parhaimpaan ratkaisuun, ja niiden kautta kirkastui lopulta ajatus toimivimmasta konseptista.

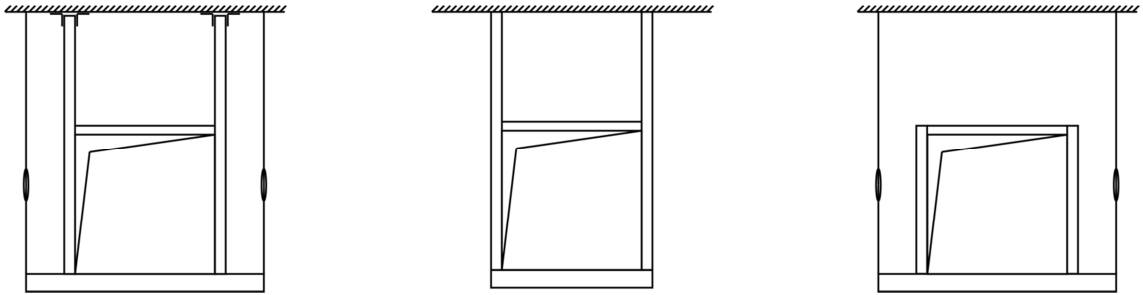
Tämä luku ei vielä ota kantaa detaljisuunnitteluun, mutta rajaa voimakkaasti suunnittelun yhteen tiettyyn konseptiin, jota myöhemmässä vaiheessa analysoidaan syvemmin. Valitusta konseptikandidaatista luodaan tämän työn teorian pohjalta lujuuslaskentatyökalu käyttäen Microsoft Excel 2010 –ohjelmistoa. Laskentatyökaluun luodaan funktiot jokaiselle laskutoimenpiteelle, jotka toimivat käyttäjän syötteiden perusteella, ja antavat tuloksena käyttökelpoisia materiaali- ja palkkiprofiilivalintoja halutulle kanavalle.

4.3.1 Konseptista järjestelmäksi

Konseptikandidaatteja punnitaan vahvasti kannakejärjestelmää ajatellen, jonka voisi ajatella olevan eräänlainen standardikuva kannaketyypin eri variaatioista. Rajataan jatkoon mahdollisimman yhtenäisiä ideoita, jotka toteuttavat modulaarisuutta esimerkiksi vaihdannaisilla osilla. Valitaan konsepti, johon sopii tietyin muunnoksin niin tangot kuin tilattavat jousielementitkin. Luotavassa perusmallissa osakomponentin vaihdolla tai lisäyksellä saadaan muutettua esimerkiksi liukuvan kannakkeen vapausasteita tai

tehtyä siitä kokonaan kiinteä. Tässä tapauksessa on tosin huomioitava väännön suunnan muutoksen aiheuttamat uudet rajoitteet käytettäville palkkiprofiileille.

Tällainen kannake on erinomainen tilanteissa, joissa joudutaan muuttamaan kannakointijärjestystä linjassa esimerkiksi kanavan muutosten takia. Verrattain pienellä muunnoksella saadaan aikaiseksi uudessa ympäristössä toimiva ratkaisu. Järjestelmän kannalta merkittävää on myös se, miten erilaiset kannaketyypit toteutetaan. Periaatteeksi valitsin muunnella perusmallista eri variaatiot tyypeittäin. Yhtenäisyys on tällöin mahdollisimman vakioitua, vakioimatta kuitenkin toimintatapaa.



Kuva 30. Kannakkeen perusmallin variaatiot kannakointityypeittäin. (Adobe Illustrator CS6)

Kuvassa 30 on esitettyä eräälle nykyiselle kannakekonseptille variaatioidea järjestelmäksi nimeltä yläpuolisesta tasosta kannakoitu kantikas vaakakanava. Eri variaatioiden välinen ero on kannakkeen puitteissa mahdollisimman modulaarinen ja yhtenäinen. Vasemmassa reunassa on esitetty edellisistä kappaleista tuttu liukukannake, josta saadaan tehtyä komponenttimuutoksella kiinteä keskimmäisen konseptikuvan mukaan. Oikeanpuolimmaisessa kuvassa on esitetty vapaa ripustus ilman ohjausosia.

Kannakoivien osien ja ohjausosien toimintojen yhdistäminen samaan komponenttiin ei ole suotavaa. Yhdistämisessä muodostuu useimmiten ongelmalliseksi kitkavoimien kasvu. Altakannakoidussa liukukannaketilanteissa tätä ei tosin voida välttää, vaan on mietittävä esimerkiksi kannakejalkojen liukulevyratkaisu, jossa kitkavoimat ovat minimoitu mahdollisuuksien mukaan. Tilanteessa ei pystytä suoraan vaikuttamaan tuentaan, joten on pohdittava materiaaliratkaisu, joka on tilanteen huomioon ottaen optimoitu, ja jossa saavutetut hyödyt ovat suurimmat.

Kannakkeessa tulisi olla kantikkaan kanavan jäykistävä porttirakenne. Portti kasvattaa kannakkeen massaa, mutta siitä saatu hyöty jäykistävänä elementtinä on tärkeämpi. Kuvan 27 konseptissa jäykistekehä oli kyseenalaistettu, mutta uuden tiedon valossa se on olennaista olla mukana rakenteessa. Jäykisteportin merkittävyyttä pohdittaessa tulisin siihen tulokseen, että kannakkeen massan kasvu kanaviston kokoluokassa on käytännössä merkityksetön. Jäykisteportti on tukijärjestelmän osa, jossa saadut hyödyt ylittävät mahdolliset massan kasvun haitat. Pyöreissä kanavissa jäykistetarve on vähäisempi, joten rakenne voi olla kevyempi. (Metso Power Oy 2009b, s. 3)

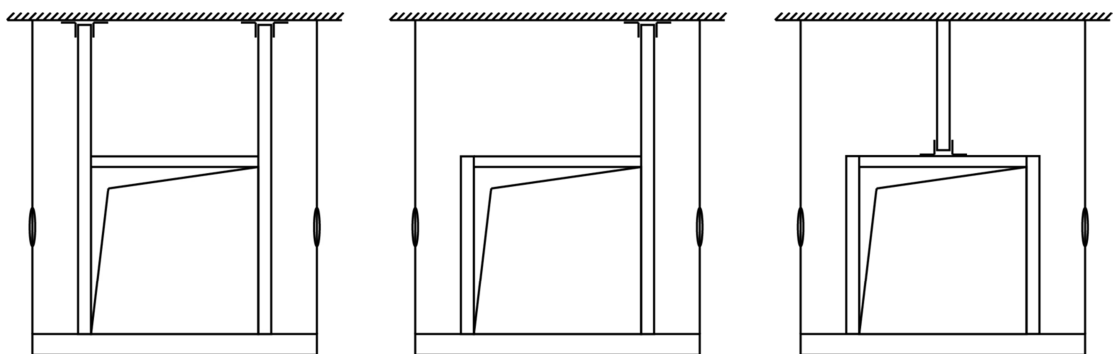
Kannakeportin yläpinnan profiiliksi voidaan valita sama teräsprofiili kuin jäykisteissä, sillä kanavan kattopinnalle ei voida sijoittaa liian järeää profiilia. Kanavajäykisteen

leveysmitta on oikea, materiaaliominaisuudet ovat riittävät sekä kannakkeen osalista pysyy minimissä. Tukijärjestelmän muita parametrejä kuten kuormaa ja massaa hallitaan tankorakentein. Tangot ottavat vastaan pitkittäissuuntaiset voimat mutta ovat samalla riittävän sallivia lämpöliikkeille. Tangoissa on otettava huomioon kiinnitys palkkiprofiileihin. Kiinnityksen on oltava sellainen, että lämpöliikkeestä aiheutuva vääntö on kompensoitu rakenteessa.

Pohdittaessa ratkaisujen globaalia käyttöä, on järjestelmän otettava huomioon ulkopuolisia rasituksia kuten esimerkiksi maanjäristykset. Maanjäristystilanteessa kanava pyrkii liikehtimään voimakkaasti joka suuntaan, joten kannakkeen lisätuenta tai riittävän järeät palkkiprofiilit ovat näiden alueiden käyttökohteissa kriittisiä. Järjestelmän on siis oltava laajennuskelpoinen eri tilanteisiin. Tämän lisäksi kanavan ohjaus on otettava huomioon erityistilanteessa. Ohjauksesta tehdään tehostetumpi kuin perustapauksissa, sillä liikevoimat ovat suurempia ja liikesuunnat vaikeammin ennustettavia. Seuraavassa keskitytään järjestelmän ja tämän työn puitteissa ensisijaiseen, tyypiltään ohjaavaan kannakkeeseen.

4.3.2 Sopivimman konseptikandidaatin valinta

Funktiorajoitteet on ratkaistu seuraavassa esitetyin konseptein. DFM tekniikassa tämä vaihe on nimetty termillä Design formation ja se tarkoittaa käsitysten kirkastumista ja uuden konseptin positiivisten erojen korostumista vanhaan toimintatapaan nähden. Tämän kappaleen tarkoitus on syventää käsitystä tutkimuskohteesta ja päätyä vaatimuksiin suotuisaan ratkaisukandidaattiin. Muutos konseptista ratkaisukandidaatiksi ei saa tuoda mukanaan konflikteja aiemmin määriteltyjen reunaehtojen kanssa. Tässä aluvuossa otetaan edellisessä kappaleessa tutkitun järjestelmääjattelun ensimmäinen variaatio tarkempaan pohdintaan.



Kuva 31. Konseptit A, B ja C (Adobe Illustrator CS6)

Kuvan 31 vasemmanpuolimmainen konsepti on variaatioidean perusmalli. Vaakasuuntainen kanava on tuettu alapuolisesta pinnastaan palkilla ja riippuu yläpuoleisesta tasosta tankojen varassa. Kanavan lämpöliikkeiden ohjaus tapahtuu pystypalkeilla, jotka ovat yläpäästään L-rautojen välissä. Pystypalkit jäykistävät kanavan kylkiä ja samalla toimi-

vat pituussuuntaisina ohjureina L-rautojen rajoittamassa suunnassa. L-rautoja ei ole hitsattu kiinni pystypalkkeihin, vaan ne toimivat pelkästään ohjaavina osina pienellä välksellä ja ovat kiinni ylätason teräsrakenteessa.

Konstruktiota käytetty Valmetissa ennenkin ja se on osoittautunut toimimaan hyvin myös seismisille kuormille. Rakenne on symmetrinen ja pystypalkit voidaan mitoittaa lujustechnisesti hyvin siten, että vinotukia tarvitaan vasta pidemmillä mitoilla. DFM analyysin reunaehdot miettiessä heikoksi puoleksi kannakevaihtoehdolle muodostuu sen kuljetettavuus. Kannakkeet hitsataan usein kiinni kanavaan jo pajalla, jonka jälkeen ne kuljetetaan laitokseen. Ulokepalkit vaikeuttavat kuljetusta ja haalausta merkittävästi. Toinen haitallinen vaikutus on, että kaksoispalkit vievät tilaa kanavan yläpuolelta ja kasvattavat kanavan ja kannakkeen yhteismassaa.

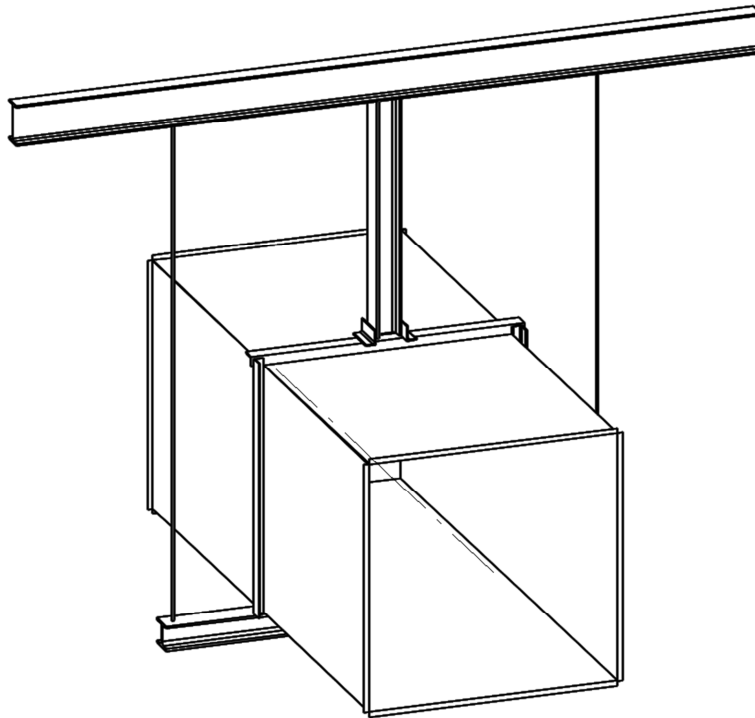
Kuvan keskimäinen sekä vasemman puoleisin konsepti ovat lujuuslaskupalaverissa esille tulleita jatkoideoita. Keskimäisessä kuvassa on kyseenalaistettu toisen ohjauspalkin tarve. Tätä voidaan perustella materiaalisäästöinä, kanavan yläpuoleisen tilan vapautumisella sekä painokilojen vähenemisellä. Kannakkeen painokilojen väheneminen tosin on hieman kyseenalainen peruste, sillä mikäli yhden pystypalkin tulisi vastata lujuudeltaan kahta, tulee siihen valita lujempi, raskaampi profiili.

Otetaan ajatustason esimerkiksi konseptin tilanne, jossa on poikkileikkaukseltaan 1000x1000 mm kanava, ja siinä ohjaukselle 500mm ylitys kanavan päällä. Mikäli käytettäisiin konseptin A mukaisesti esimerkiksi kahta HEB120 palkkia, joiden pituus on 1500mm, kannakkeen pystyprofiilien yhteismassaksi tulisi metrimassasta laskettuna 80,1 kilogrammaa. (Oy Kontino Ab 2013, s. 29) Mikäli kannake korvattaisiin konseptin B vaihtoehdolla, johon käytettäisiin ohjaukseen yhtä 1500 millimetrin HEB160 –profiilia sekä toisena kylkijäykisteenä esimerkiksi 1000 millimetrin IPE100 –palkkia, profiilien laskennallinen yhteismassa on tällöin 72 kilogrammaa. (Oy Kontino Ab 2013, s. 27-29) Kannakkeen massan kannalta noin 8 kilogramman säästö ei ole merkittävä kanavan kokoluokassa. Mikäli vaadittaisiin vielä tämän lisäksi vinotuentaa, kasvaisi massa entisestään. Tästä syystä konsepti B hylätään. Lisähuomiona mainittakoon vielä, että usein kanava olisi syytä ohjata siten, että keskilinja olisi paikallaan. Konseptissa B se ei onnistu. Ratkaisu saattaisi olla hyvä, mikäli kuormat pysyisivät hyvin pieninä, esimerkiksi tilanteessa, jossa ohjauksen tarkoitus olisi ainoastaan estää kanavan heiluminen.

Oikeanpuolimmainen kannake C on kokonaan uusi konsepti, joka ratkaisee useita lujuuden kannalta merkittäviä ongelmia. Ohjauspalkki on kiinnitetty teräsrakennepalkkiin ja kanavaa ohjaavat liukupalat ovat kiinni kanavajäykisteessä. Materiaalisäästöjen lisäksi keskilinja on paikallaan ja sivuttaisvoiman aiheuttaman siirtymän ja väännön nivelkohta on lähempänä kanavaa, jolloin tilanne on lujuusopillisesti suotuisampi. Merkittävää massan kasvua ei konseptissa esiinny, sillä ohjauspalkki kiinnittyy vain teräsrakennepalkkiin.

Valitaan uudistusten edut mielessä pitäen ratkaisukandidaatiksi siis konsepti C. Konsepti C täyttää kannakkeelle asetetut reunaehdot hieman erilaisin painotuksin totuttuun konseptiin A verrattuna. Detaljitarkastelussa keskitytään laskemaan konseptin C

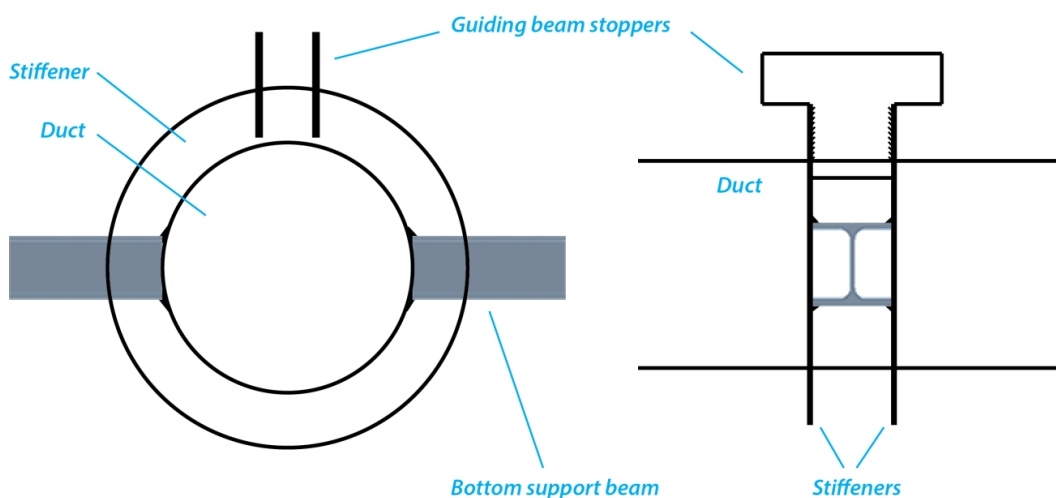
käypyyttä vaihtoehtoiseksi rakenteeksi, sillä A on ollut käytössä ja sen kyvykkyys on osoitettu käytännössä.



Kuva 32. Ratkaisukandidaatti: Kannakekonsepti C. (Vertex G4 Laitossuunnittelu 2013)

Ratkaisussa käytetään mahdollisimman vähäistä määrää erilaisia teräspalkkiprofiileja, sillä turha osaluettelon kasvu saattaa tuoda ongelmia ja sekaannuksia työmaalla. Lisäksi etuna on suunnittelijan osalta PDMS –kirjastosta tarvittavien komponenttien järkevä määrä.

Kannakekonseptia on järkevää pohtia myös järjestelmää ajatellen laajentamalla ideaa kantikkaasta kanavatyyppistä pyöreisiin. Konseptitason suunnitelma pyöreän kanavan toteutuksesta on esitetty kuvassa 33.



Kuva 33. Pyöreän kanavakannakkeen konsepti. (Adobe Illustrator CS6)

Kannake olisi mahdollista toteuttaa hitsaamalla alapuoliset tukipalkit kanavan kylkiin jäykistekehien sisäpinnoista. Palkkiprofiilit tulee sijoittaa kuvan osoittamalla tavalla uuma pystysuuntaisesti, sillä silloin palkki on jäykimmillään ja taivutuskäyttäytyminen minimissä. Tukitangot kiinnittyisivät palkkeihin kuten kantikkaan kanavan konseptissa. Ohjausteräkset hitsataan kiinni kanavan jäykistekehiin, mutta levy tulee loventaa kehien mitalta, sillä tarvittava lämpöliikkeen ohjauspituus on usein pidempi kuin jäykisteiden väli.

Tämän työn laskenta keskittyy kuitenkin vain kantikkaan kanavakonseptin ratkaisuun, ja pyöreän kanavan osalta suunnittelutyö jätetään konseptointiasteelle. Tämän työn kannalta sen merkitys on olla tukemassa järjestelmäajattelun ideaa ja pysytellä esimerkin omaisena huomiona kannakekirjaston luontia ja laajennusta ajatellen.

5 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

Tässä luvussa verifioidaan ratkaisukandidaatin mukaisen kannakkeen suunnitteluun kehittämäni laskentatyökalun käyttökelpoisuus laskemalla tietyn kannakerakenne- case-esimerkin tekniset vaatimukset analyttisesti sekä tarkistamalla tiettyjä tuloksia vertaamalla niitä elementtimenetelmällä saatuihin arvoihin. Edellisessä kappaleessa muodostuneen kannakekonseptin C toiminnan todentaminen laskennallisesti ja kannakkeen laskentatyökalun todentaminen myös muille kanavakoille ja kuormatilanteille on tämän kappaleen ydinasia.

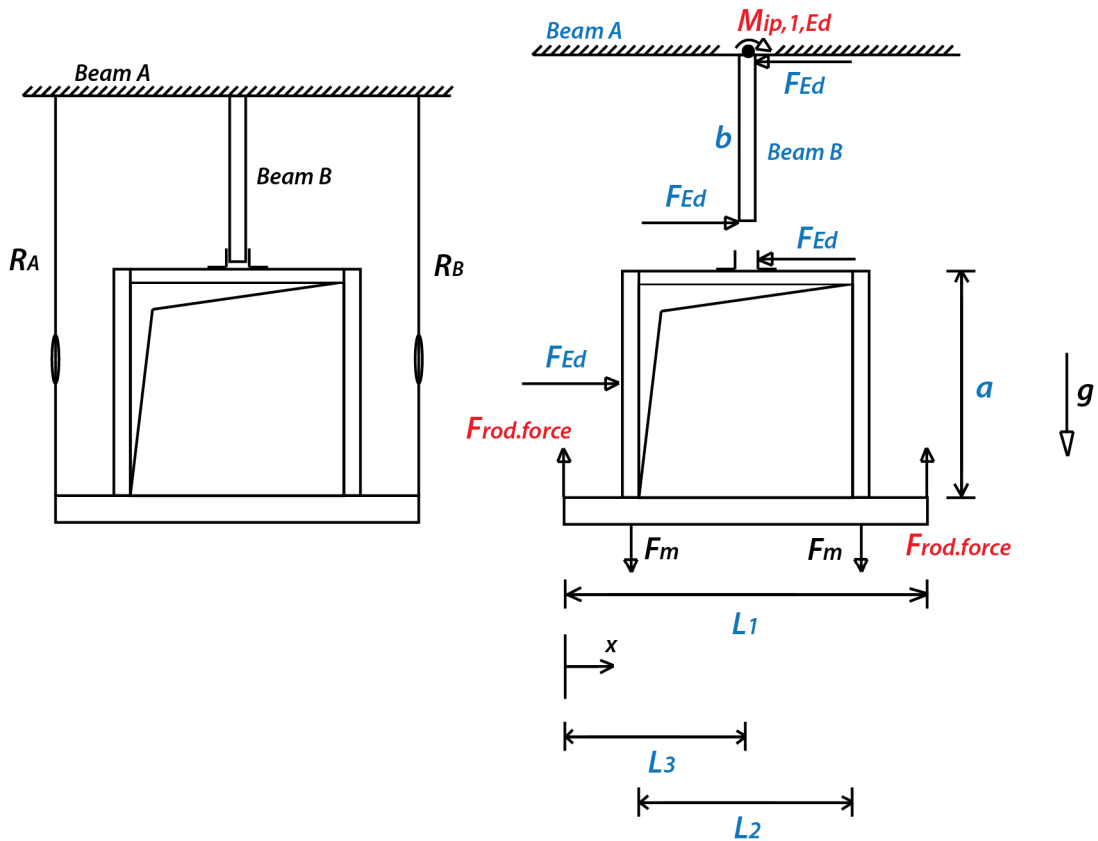
5.1 Laskentatyökalun toiminta

Laskentatyökalu toteutettiin Microsoft Excel 2010 -taulukkolaskentaohjelmalla. Työkalu, usein laskentapohjana kutsuttu dokumentti pitää sisällään teoriaosuuden laskukaavat symbolisina solumuodossa siten, että kukin termi vastaa jotain tiettyä solua Exceldokumentissa.

Käyttäjä syöttää dokumenttiin tilanteen mukaan kyseessä olevan kanavan mitat, teräsrakennekalkin profiiliin, ohjauspalkin profiiliin, tilavarauksen kanavan päällä sekä vallitsevan sivuttaisvoiman. Laskentapohja suorittaa laskutoimitukset ja kertoo syötteiden perusteella onko suunniteltu rakenne sopiva. Mikäli rakenne ei kestä, työkalu kertoo mikä osa-alue pettää ja käyttäjä voi tämän jälkeen vaihtaa profiilivalintoja tai muuttaa syötteitä kunnes rakenne kestä. Työkalu on siis luonteeltaan iteratiivinen, sillä laskentasilmutka toteutuu aina profiilivalinnan jälkeen. Tämän työn puitteissa teräsrakenneprofiiliksi on valittavana mikä tahansa IPE -standardiprofiili ja ohjauspalkiksi mikä tahansa HEB -standardiprofiili.

Teoriaosuuden eri osa-alueet on jaettu funktiomuotoisina laskentadokumentin välilehdille ja laskenta tapahtuu Valmetin pyynnöstä pääosin piilossa käyttäjältä. Laskennan toteutin Excelin sisäisillä funktioilla ja pudotusvalikoilla, jotka aktivoivat uuden laskentasilmutkan aina, kun käyttäjä vaihtaa parametreja laskentatyökalun etusivulta. Syötteitä muuttamalla voidaan siis hakea iteratiivisesti sopiva rakennekonfiguraatio kyseiselle kanavatyypille.

Kuvassa 34 on esitetty laskentatyökalun etusivulle sijoitettu tilannetta havainnollistava esimerkkikuva, jossa syötettävät arvot on merkitty sinisellä ja osa syöteriippuvista tuloksista on esitetty kuvassa punaisella värillä.



Kuva 34. Leikkauskuva sekä vapaakappalekuva kanavakannakesysteemistä syötemitoin. (Adobe Illustrator CS6)

Kuvan 34 tarkoitus on olla mahdollisimman havainnollistava, mutta riittävän yksinkertainen, jotta arvojen syöttö sekä syötteen ja tuloksen ero ei olisi epäselvää asiasta perehtyneelle käyttäjälle. Kuvaan on merkitty kanavan ulkomittaperusteiset syöteparametrit. Muut parametrit on ilmoitettu erikseen laskentatyökalun solusarakkeilla.

Choice of overhead steel structure beam		
Steel construction beam (A) profile:	ipe	220
Choice of guiding beam		
Beam (B) profile:	HEB	120
Details of the duct and support structure		
Joint mass of duct and duct support		
Vertical load per rod in static review		
		F_m

Kuva 35. Laskentatyökalun pudotusvalikot: Palkkiprofiilien valinta. (Microsoft Excel 2010)

Parametrien syöttö tapahtuu siten, että suunnittelija antaa joko numeeriset arvot käsin tai valitsee tiettyihin soluihin luoduista pudotusvalikosta tarjottavista vaihtoehdoista sopi-

vimman. Esimerkiksi kuvan 35 tapauksessa palkkiprofiilin vaihto aktivoi vlookup -funktion, joka hakee kaikki uuden palkkiprofiilin mukaiset arvot tietyltä taulukon riviltä ja sijoittaa ne jokaiseen laskentatyökalun funktioon edellisten tilalle. Vaihtoehtoja rajataan pudotusvalikoilla Valmetin kanavas suunnitteluohjeen puitteissa käytettyjen rakeneterästen valikoimaan, jotta työkalun käytettävyys ei kärsisi. Syötesolut on korostettu laskentatyökalun etusivulla sinisellä värillä.

Recommended profile for bottom support beam:			HEB120	
<i>This calculation tool recommends only HEB profiles as bottom support.</i>				
<i>If other beam profiles are compulsory it is possible to use recommendations in this document as reference.</i>				
<i>In this case:</i>		σ_{sall}	156,6667 N/mm ²	
		W	140,8883 10 ³ mm ³	

Kuva 36. Alapalkkiprofiiliehdotus sekä siihen liittyvät mitoitusarvot. (Microsoft Excel 2010)

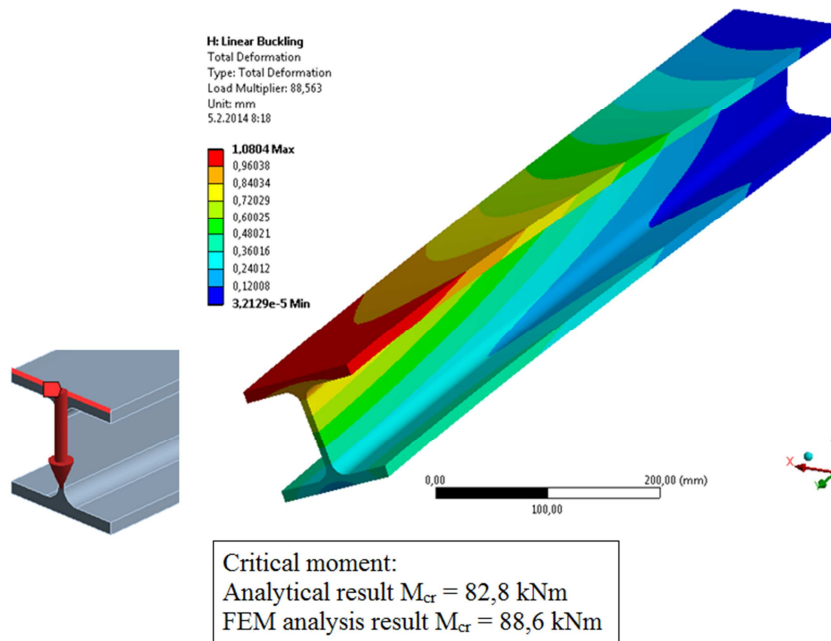
Laskentatyökalu palauttaa suosituksena kevyimmän mahdollisen palkkiprofiilin jokaisessa tutkittavassa kuormitustilanteessa. Taulukkomuotoiset vertailuarvot ovat sijoitettu toiselle välilehdelle, josta kyseinen funktio palauttaa oikean ehdotelman etusivulle sekä lisätietona ilmoittaa tärkeät lujuusparametrit, mikäli suositusta ei ole mahdollista noudattaa.

Laskentatyökaluun on lisäksi sisällytetty kannakerakenteen lujuusopilliseksi yhteenvedoksi osa-alueittain jaoteltu käyttöastetaulukko. Käyttöastetaulukko kertoo kuormituksen suhteellisen osuuden sallitusta arvosta. Se kertoo myös mikäli, jokin osa-alue vaatii lisähuomiota. Käyttöastetaulukot ovat esitettynä esimerkkitapausten tuloksissa.

5.1.1 Kiepahdustarkastelun verifiointi

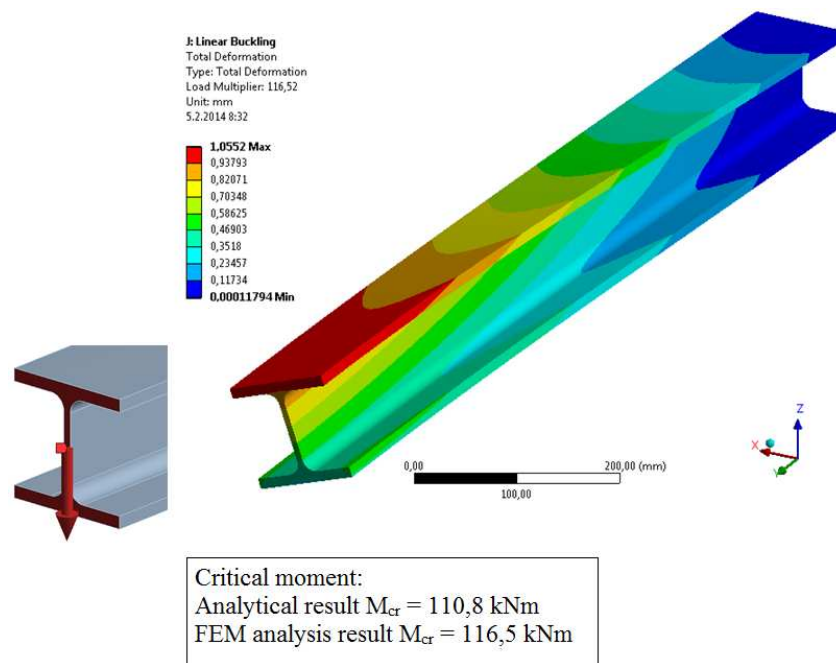
Ohjauspalkille tehtävän analyttisen kiepahdustarkastelun ratkaisun laskemisessa käytettiin päistään nivelellisesti tuetun ja palkin keskeltä pistevoimalla kuormitetun palkin tapausta, joka vastaa tarkasteltavan palkin tapausta kun tarkastelussa hyödynnetään symmetriaa. Tilanne on esitetty kuvassa 16 kolmantena kuormitustapauksena.

Ratkaisun verifiointiseksi tehdään tapauksen ristiintarkistus kiepahduskestävyyden kriittiselle kiepahdusmomentille (Kaava 25) elementtimenetelmällä. Tarkistus toteutettiin Ansys linear buckling -tarkastelulla. Kuvissa 37-39 on esitetty kannakkeen ohjauspalkin vertailutulokset elementtimenetelmällä ratkaistuna. Kuormituksen aiheuttama momentti vaikuttaa poikkileikkauksen vahvemman symmetria-akselin ympäri. Linear buckling –tarkastelussa kiertymä pystyakselin suhteen on vapaa ja poikki pinnan käyristyminen on mahdollista. Kuormitusanalyysissä asetettiin 1000 Newtonia ensin palkin leikkauspinnan yläsärmään, sen jälkeen leikkauspinnan keskikohtaan ja lopuksi leikkauspinnan alasärmään.



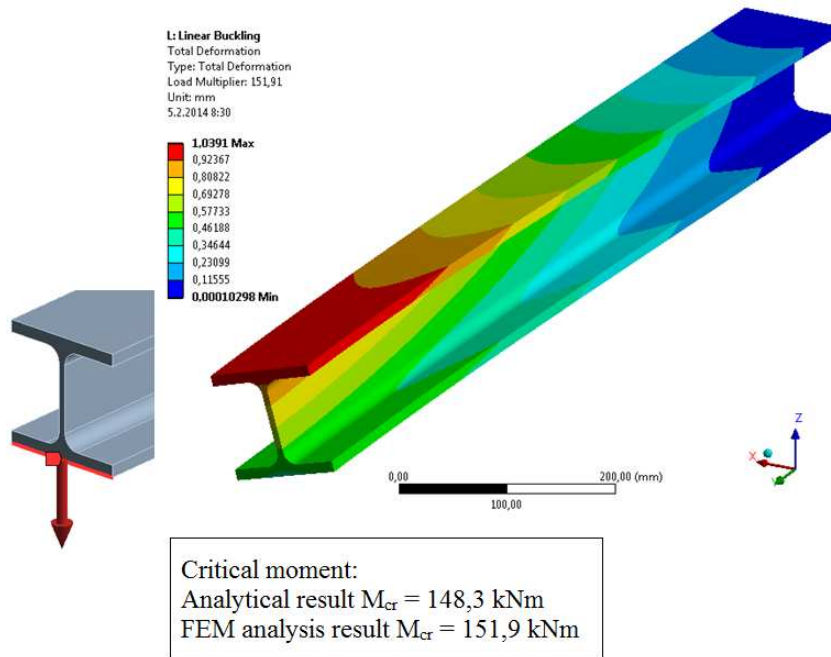
Kuva 37. Ohjauspalkin leikkauspinnan yläsärmän tarkastelu. (Ansys)

Kuvassa 37 on esitetty ohjauspalkkiprofiilin HEB kiepahdustarkastelu, kun kuormittava pistevoima asetetaan leikkauspinnan yläsärämään. Deformaation voimakkuutta kuvataan vakavuudesta riippuen väreillä sinisestä punaiseen. Kuvasta voidaan todeta profiilin kriittisen momentin analyttisten laskutoimitusten, jota laskentatyökalussa käytetään, käyvän hyvin yhteen elementtimenetelmällä saatujen kanssa. Analyttinen tulos on approksimaatioista johtuen hieman konservatiivisempi kuin FEM –laskennan tulos, mutta laskennallisen varmuuden kannalta tämä on hyvä asia.



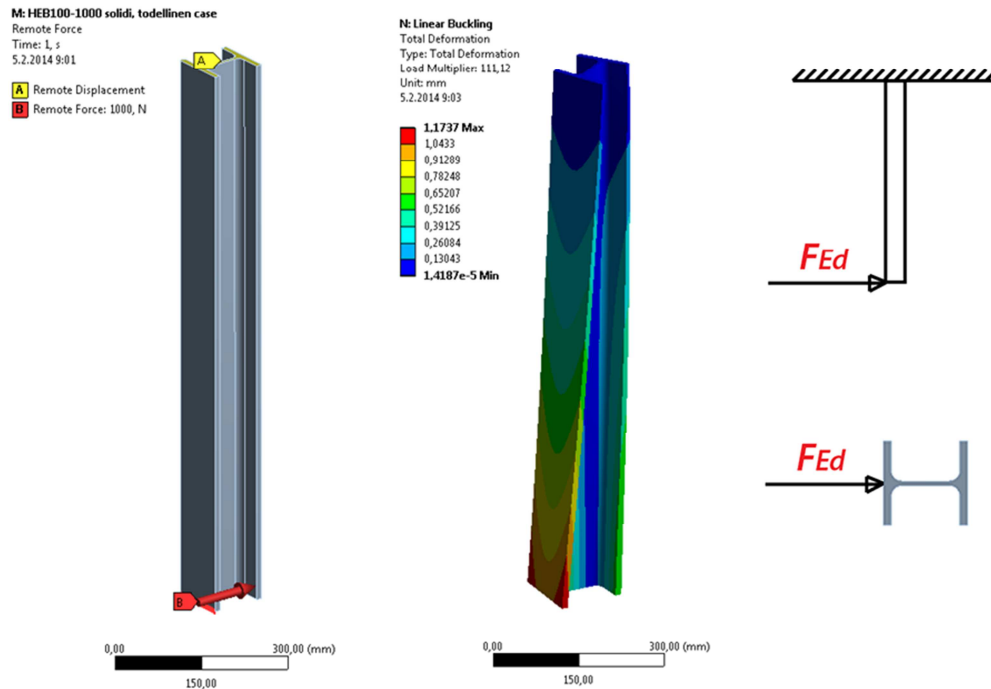
Kuva 38. Ohjauspalkin leikkauspinnan keskikohdan tarkastelu. (Ansys)

Leikkauspinta asetettua palkin keskikohtaan kriittinen momentti kasvaa, mutta analyytinen tulos on edelleen tuloksista konservatiivisempi. Sama havainto voidaan tehdä si-
joittamalla kuormitus palkin leikkauspinnan alasärmään (kuva 39).



Kuva 39. Ohjauspalkin leikkauspinnan alasärmän tarkastelu. (Ansys)

Vertailutulosten lisäksi tarkastelussa oli todellinen tapaus, jotta nähdään kuinka hyvin saadut tulokset vastaavat symmetrian kautta ekvivalenttia kuormitustapausta. Kuormitustapausta muutettiin edellisistä analyyseistä siten, että palkin yläpään siirtymät ja kiertymät ovat estetty ja kuormitus vaikuttaa palkin alapään siihen särmään, joka vaikuttaa kuormituksen puolella. Tämä mukailee parhaiten kannakointitilannetta. Palkin yläpään kiinnityksessä poikkileikkauksen muodonmuutoksia ei ole estetty.

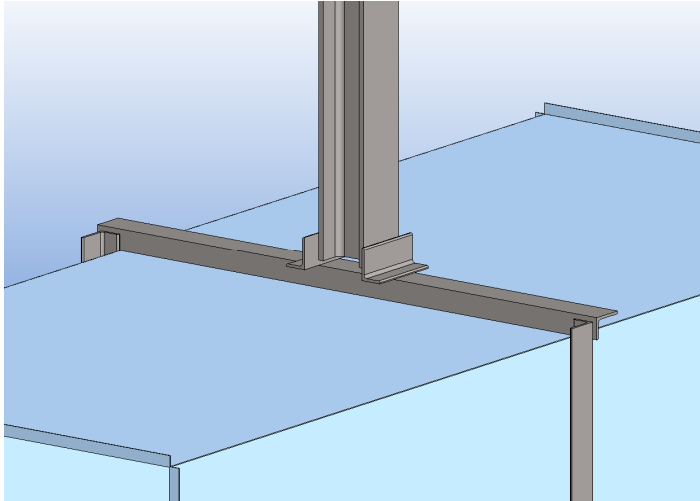


Kuva 40. Todellinen ohjauksen mitoitus tilanne. (Ansys)

Analyysin mukaan kriittinen momentti todelliselle tapaukselle on noin 111 kNm. Siten ekvivalentilla tapauksella laskettu kriittinen momentti on konservatiivinen. Tulokset vastaavat paremmin ekvivalenttia tapausta, jossa kuormitus vaikuttaa palkin poikkileikkauksen keskikohtaan. Kriittiselle momentille saadaan siis lähekkäisiä arvoja sekä analyttisellä laskennalla, että elementtimenetelmällä. Analyttiset arvot ovat hieman konservatiivisempia, mutta ne pitäytyvät turvallisella alueella ja ovat erittäin käyttökelpoisia laskennassa.

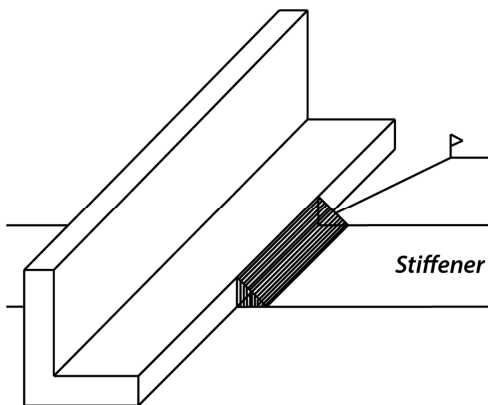
5.1.2 Jäykistekehä ja ohjauspalkin ohjauspalat

Jäykistekehän profiiliksi valitaan Valmetin ohjesääntöjen mukaisista vaihtoehtoista erikylkinen L-kulmateräs. Vaikka kanavan katolle sopisi järeämpikin profiili, niin kanakkeen massaa ei kannata kasvattaa liikaa. L-teräs sijoitetaan siten, että pidempi kylki tulee kanavan katolla ylöspäin ja jäykistekehän teräsprofiilit hitsataan selkäpinnoistaan kiinni toisiinsa. Kanavan ohjauspalkin liike rajataan samalla profiililla sijoittamalla kulmateräkset kanavan jäykisteen yläpintaan hitsaamalla ne koko jäykisteen leveysmitalta.



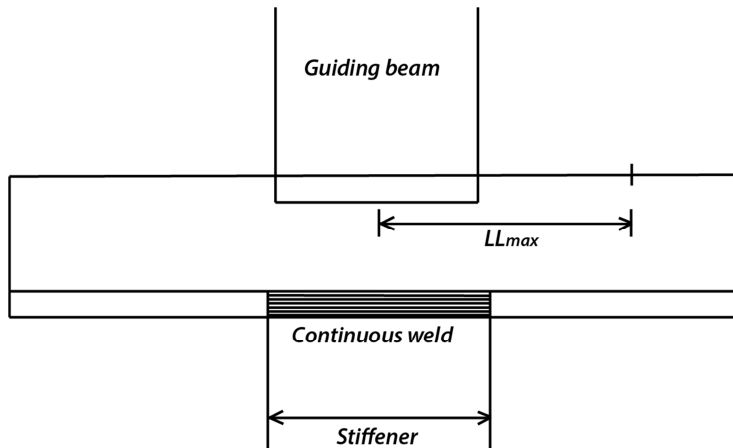
Kuva 41. Kanavan jäykistekehä ja ohjauksen liitoskohta. (Vertex G4 Laitossuunnittelu 2013)

Laskentatyökalussa on määrätty sama profiili käytettäväksi ohjauspalkin ohjauspaloihin ja jäykistekehään. Tämä siksi, että hitsisaumojen laskennassa sauman pituusmitta olisi riittävä ja laskennan parametreja olisi suunnittelijoita ajatellen vakioitu. Kuva 21 osoittaa ohjauspaloissa laskettavat tärkeimmät kuormat.



Kuva 42. Jäykistekehän ja ohjauspalkan välinen hitsiliitos. (Adobe Illustrator CS6)

Kannakkeen riipputangot tulisi esijännittää mahdollisuuksien mukaan, jotta ohjauspalkki olisi mahdollisimman keskellä ohjauspaloja kuumatilanteessa. Tällöin kanavan liikkeistä aiheutuvien momenttivektorien resultantti ei ole voimakkaimmillaan. Esijännitys on kuitenkin tilanteenmukaista, eikä muutaman millimetrin epäkeskeisyyttä kannata ohjeistaa esijännitettävän. Kanavaan kohdistuvien voimien summa ohjauspalkin ja kanavan kosketuskohdassa eli momenttivektorien ja viivakuormien resultantti saadaan laskettua suunnikassäännöllä kaavan 48 mukaisesti.



Kuva 43. Ohjauslevyn ja ohjauspalkin lämpöliikkeestä aiheutuva epäkeskeisyys. (Adobe Illustrator CS6)

Momenttivaikutuksen resultanttivektoria laskettaessa otetaan huomioon kuvan 21 lisäksi myös kanavan lämpöliikkeestä aiheutuva siirtymä konservatiivisesti. Kuvassa 43 on esitetty lämpöliikkeen maksimipituus termillä LL_{max} . Sen aiheuttama vaikutus resultantiin on otettu huomioon laskennassa ja sen vaikutus oletetaan olevan aina pahin mahdollinen.

Lämpötilan vaikutusta laskettaessa kannakerakenteeseen, on eräs huomio erittäin merkittävä. Mikäli kannakekonsepti pidettäisiin nykyisellään kuvan 30 kannakekonseptin C mukaisesti, tulisi ottaa ohjauksessa erityisesti huomioon lämpötilan vaikutus kannakerakenteisiin kuumatilassa. Lämpötilalla on erityinen vaikutus laskennalliseen kimmokerrotimeen. Kimmokerrointa joudutaan alentamaan laskennassa kappaleen 3.4.8. mukaisesti. Kaavan 40 ja taulukon 8 pienennystekijän avulla saadaan alennetuksi kimmokerrotimeksi 184,5 GPa alkuperäisen 205 GPa sijaan. Tällä on vaikutusta rakenteen jäykkyyssominaisuuksiin, kuten esimerkiksi liikkeiden sallivuuteen. Tämä ei välttämättä ole kriittinen asia, mutta koska rakenne voidaan toteuttaa yksinkertaisemmin uudella konseptilla, lämpötilavaikutuksen voidaan katsoa olevan heikentävä tekijä ja siten jättää vanha konsepti kokonaan pois harkinnasta.

5.2 Lähtötiedot

Valitaan esimerkkitilanteiksi ensin niin sanottu oletustilanne, jossa sivuttaissuuntainen voima on laskennassa 10% pystysuuntaisesta kuormasta. Tämä mitoitus tilanne on sopiva perustapauksissa, joissa ei maantieteellisistä tai muista syistä huomioida maanjäristyskuormia tai muita erityistilanteista johtuvia suunnitteluparametrejä. Tilanteen laskenta kertoo siis millainen rakenne olisi sopiva, mikäli kanavaan ei kohdistu merkittäviä kuormituspiikkejä.

Toinen case-esimerkki on tilanne, jossa otetaan huomioon laitostoimituksen maantieteellinen sijainti maanjäristysalueella. Mitoituslaskennassa kohdistetaan voimakas sivuttaissuuntainen kuormitus suoraan kanavan kylkeen. Tapauksessa käytetään sivuttaissuuntaisena voimana yhtä suurta arvoa kuin kanavan ja kannakkeen yhteismassasta aiheutuva kuorma. Laskentatyökalussa on erikoistilanteita varten syötekenttä, johon on mahdollista syöttää suoraan kanavan kylkeen kohdistuvan sivuttaisvoiman arvo, jota sen jälkeen käytetään laskennassa. Mikäli erityistä voimaa ei syötetä, laskentatyökalu laskee kanavakannakkeelle oletustilanteen mukaisen kuormituksen.

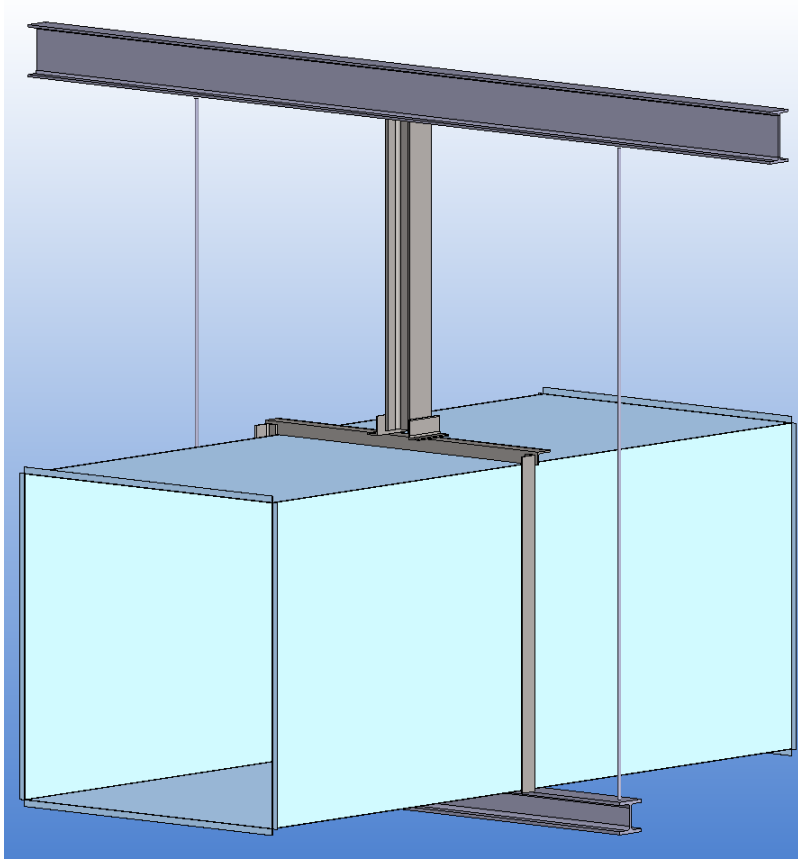
5.2.1 Oletustilanteen laskenta

Valitaan ensimmäiseen esimerkkitilanteeseen teräsrakennepalkiksi käyttökohteissa vähimmäisvahvuinen IPE160 standardipoikkileikkauksinen palkkiprofiili ja ohjaukseen vähintään HEB100 palkkiprofiili. Lähtötiedot ja kanavan alustavat tulospaametrir oleustilanteelle ovat seuraavat:

Taulukko 10. Kanavakannakkeen paametrir.

Kanavan ja kannakkeen yhteismassa	3000 kg
Ohjauspalkin pituus	1000 mm
Kanavan korkeus	2000 mm
Kanavan leveys	2000 mm
Kanavan keskilinjan etäisyys alapalkin päästä	1500 mm
Kanavan kylkeen kohdistuva sivuttaisvoima	3 kN
Staattisen tapauksen momentti palkin juuressa	4,4 kNm

Ohjauspalkin pituus voi vaihdella kannakeympäristön perusteella noin 300 millimetristä aina kahteen metriin. Usein sen määrää tilavaraus kanavan päällä, joten työkaluun voidaan syöttää mitä tahansa pituusmittoja ohjauspalkille tapauksesta riippuen. Valitaan laskentaan ohjauksen pituudeksi 1000 millimetriä, sillä se on lähellä keskiarvoa ja laskennallisesti sopiva mitta. Havainnekuvat rakenteesta on esitetty alla.



Kuva 44. kannakekonseptin 3D-malli. (Vertex G4 Laitossuunnittelu 2013)

Kanavan alla olevaksi palkkiprofiiliksi laskentatyökalu ehdottaa yhtenä tuloksena sopivaa HEB -palkkiprofiilikokoa. Alapalkin pituusmitta, kanavan leveys sekä kanavan keskilinjan etäisyys palkin päädyistä on syötettävä laskentatyökaluun. Oletustilanteessa kanava sijaitsee keskellä alapalkkia, jonka pituus on 3000 millimetriä.

Jäykistekehässä on käytetty Valmetin ohjeen mukaisesti L-rautaa selkäpinnoiltaan yhteen hitsattuna. L-raudan koko vaikuttaa sen jäykkyysominaisuuksiin, ja laskentatyökalussa on valittavissa sopiva koko pudotusvalikosta. Rajoitteena on, että ohjauspalkin ohjauspalat ovat samaa profiilia kuin jäykistekehä.

Ratkaistava mitoitusongelma vaatii lisäksi muita suunnitteluparametreja, joita esitellään seuraavassa. Palkkiprofiilien laskennassa tarvittavat taulukkoarvot on otettu Oy Kontino Ab:n varaosataulukosta sekä Rautaruukki Oyj:n hitsattujen profiilien käsikirjasta IPE ja HEB -palkkiprofiileille ja ne on sisällytetty laskentatyökaluun. Alla on esitetty ohjauspalkin HEB100 arvot:

Taulukko 11. Ohjauspalkin HEB100 arvot. (Oy Kontino Ab 2013, s. 29; Rautaruukki Oyj 2010, s. 155)

Kimmoteorian mukainen taivutusvastus	W_{el}	$89,91 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$
Uuman korkeus	h_w	56 mm
Uuman paksuus	t_w	6 mm
Laipan paksuus	t_f	10 mm
Nimellinen myötölujuus	f_y	235 N/mm ²
Muokkauslujittumisen huomioon ottava tekijä	η	1,2
Poikkileikkauksen pinta-ala	A	2604 mm ²
Palkkiprofiilin kokonaisleveys	b	100 mm
Nurkan pyöristyssäde	r	12 mm

Vastaavasti tarvittavat arvot IPE160 palkille saadaan myöskin Oy Kontino Ab:n luettelosta:

Taulukko 12. Teräsrakennepalkin IPE160 arvot. (Oy Kontino Ab 2013, s. 27)

Nimellinen myötölujuus	f_y	235 N/mm ²
Poikkileikkauksen pinta-ala	A	2009 mm ³
Palkkiprofiilin kokonaisleveys	b	82 mm
Laipan paksuus	t_f	7,4 mm
Uuman paksuus	t_w	5 mm
Nurkan pyöristyssäde	r	9 mm
Uuman korkeus	h_c	145,2 mm

Lisäksi tarvitaan muita, teoriaosuudessa kuvattuja palkkiprofiilista riippuvia termejä, jotka ovat taulukkotietoina listattu työkalun välilehdille. Palkkiprofiilien kokoa muuttamalla arvotkin muuttuvat vastaavasti laskentatyökalussa.

5.2.2 Erityistilanteen laskenta

Erityistilanteen, usein maanjäristysalueen kuormitustilanne on oletustilanteeseen verrattuna erittäin voimakas ja kanavaa kohtaan väkivaltainen. Mitoitukseltaan sitä täytyy miettiä hieman eri tavalla. Maanjäristystilanteessa kanavaan kohdistuu voimakkaita kuormituksia mistä tahansa suunnasta ja millä tahansa amplitudilla. Laskennassa tämä otetaan huomioon maantieteellisestä alueesta riippuen mitoittamalla kannake kestäämään esimerkiksi koko kanavan sekä kannakkeen yhteismassan suuruisen kuorman sivuttaissuunnassa.

Tarkastellaan erityistilannetta, jossa teräsrakennepalkkina on standardipoikkileikkauksinen IPE270 -palkki. Voimakkaasta sivuttaissuuntaisesta kuormasta johtuen sopi-

va ohjauspalkkiprofiili on haettava iteroimalla valitsemalla eri profiileja kunnes kestävyys ehdot täyttyvät. Kannakkeen lähtötiedot ja alustavat tulospaarametrit ovat seuraavat:

Taulukko 13. Kanavakannakkeen paarametrit.

Kanavan ja kannakkeen yhteismassa	4000 kg
Ohjauspalkin laskennallinen pituus	495 mm
Kanavan korkeus	1950 mm
Kanavan leveys	2400 mm
Kanavan keskilinjan etäisyys alapalkin päästä	1500 mm
Kanavan kylkeen kohdistuva sivuttaisvoima	40 kN
Staattisen tapauksen momentti palkin juuressa	29,7 kNm

Taulukon 13 paarametrit ovat erään todellisen kanavan kuormitustilanteesta, jota tässä työssä käsitellään case-esimerkkinä. Tilanne eroaa edellä kuvatusta oletustilanteesta siten, että mitoitusongelmana on löytää ohjauspalkkia myöden sopiva kannakerakenne tämän työn konseptilla. Ainoa lähtötieto kanavan mittojen ja kuormitustilanteen lisäksi on kanavalinjan yläpuolella oleva poikittainen teräsrakennepalkki.

Taulukko 14. Teräsrakennepalkin IPE270 arvot. (Oy Kontino Ab 2013, s. 27)

Nimellinen myötölujuus	f_y	235 N/mm ²
Poikkileikkauksen pinta-ala	A	4594 mm ³
Palkkiprofiilin kokonaisleveys	b	135 mm
Laipan paksuus	t_f	10,2 mm
Uuman paksuus	t_w	6,6 mm
Nurkan pyöristyssäde	r	15 mm
Uuman korkeus	h_c	249,6 mm

Kannakkeen ohjauspalkki liittyy taulukon 14 mukaiseen teräsrakennepalkkiin. Huomatavaa on, että tilavaraus kanavan päällä on vain 495 mm, joten kannake olisi tehokkainta toteuttaa ilman vinotuenta ohjauksessa.

5.3 Tulokset

Tässä luvussa kootaan yhteen laskentatyökalun antamat tulokset edellisessä luvussa kuvatuissa tilanteissa. Tämän kappaleen ydinasiaa on saatujen tulosten käyttökelpoisuus sekä se, kuinka laskentatyökalu opastaa suunnittelijaa havaitsemaan rakenteen kriittiset parametrit ja antaa palautetta mitoituksen käyttökelpoisuudesta.

5.3.1 Oletustilanteen tulokset

Luvussa 5.2.1. esitellyillä parametrien arvoilla rakenne täyttää kaikki sille asetetut kriteerit analyttisessä ratkaisussa. Tarkastellaan analyttisestä ratkaisusta tarkastelukohteittain jaoteltua käyttöastetaulukkoa, josta nähdään kunkin parametrin arvo suhteutettuna suurimpaan mahdolliseen vielä hyväksyttävään arvoon:

Taulukko 15. Analyttinen ratkaisu oletustilanteessa.

Kuvaus	Arvo / Käyttöaste	Viite
Taivutuskestävyys	21 %	Kaava 6
Leikkauskestävyys	2 %	Kaava 10
Leikkauslommahduskestävyys	Merkityksetön	Kaava 13
Kestävyys taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutukselle	Merkityksetön	Kaava 10, luku 3.4.5.
Kiepahduskestävyys	18 %	Kaava 17
Teräsrakennepalkin uuman leikkaus	42 %	Kaava 29, 31
Teräsrakennepalkin uuman poikittainen puristus	52 %	Kaava 29, 33
Teräsrakennepalkin uuman poikittainen veto	52 %	Kaava 29, 35
Teräsrakennepalkin laipan taivutus	28 %	Kaava 29, 36
Ohjauspalkin laipan ja uuman puristus	21 %	Kaava 29, 38

Kriittisimmiksi ilmiöiksi rakenteessa muodostuvat teräsrakennepalkin uuman poikittainen puristus ja teräsrakennepalkin uuman poikittainen veto. Nämä ovat järjestelmän kannalta kyseisen kannakkeen kuormaa kasvatettaessa suunnittelutyön tärkeimmät näkökohdat. Raja-arvojen kasvaessa kriittisen momentin tai palkkiprofiilien liitoksen kestävyystarkastelun yli on konstruktion otettava mukaan lisätuentaa esimerkiksi uuman jäykisteellä. Tässä tapauksessa lisätuennalle ei ole tarvetta ja laskentatyökalu ilmoittaa siitä punaisella huomiotekstillä. Lisäksi laskentatyökalu ilmoittaa jokaisen osa-alueen tarkastukset erillisinä tekstikenttinä, joista näkee onko kaikki sallituissa rajoissa. Mikäli jokin osa-alue ei pysy sallitulla alueellaan, tulee tuloksena virheilmoitus. Työkalu ilmoittaa rakenteen olevan jokaiselta osa-alueelta validi.

Alapalkkiprofiiliksi laskentatyökalu antaa ehdotuksena profiilin HEB120, sillä se on lujuusominaisuuksiltaan riittävä kyseiselle tuennalle ja kuormitukselle. Taivutusvastus

on tällöin konservatiivisen kuormitustarkastelun mukaan $140,9 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$ ja sallittu jännitys kyseiselle palkkiprofiilille $156,7 \text{ N/mm}^2$. Alapalkiksi voidaan valita muukin vähintään vastaava profiili, mutta laskentatyökalun ehdotus on modulaarisuuden ehdoilla yhtenäistämistarkoituksissa sovelias. Tilanteissa, joissa se on mahdollista, on käytännöllistä toteuttaa ratkaisu mahdollisimman vähällä määrällä erilaisia profiileja. Tässä tapauksessa ohjaus sekä tukitoiminnot toteutetaan samalla palkkiprofiilityyppillä.

Ohjauspalkin ohjauspaloiksi valitaan pudotusvalikosta sopiva käytössä oleva teräsprofiili, jonka lujuusominaisuudet toteuttavat kaavan 42. Laskentatyökalu ilmoittaa, mikäli valittu profiili ei läpäise sille asetettuja vaatimuksia. Sopivia kandidaatteja tilanteelle ovat esimerkiksi $50 \times 40 \times 5$ ja $60 \times 40 \times 5$ kulmateräket tai mikä tahansa vahvempi vaihtoehto. Vallitseva kaavan 48 mukainen resultanttivoima on tällöin 119 N/mm .

Ripustustankojen osalta laskentatyökalu kertoo niissä vaikuttavan voiman, sivuttaiskuormasta aiheutuvan momenttivaikutuksen sekä niiden perusteella valitsee kuormitetumman tangon ja käskää suunnittelijaa mitoittamaan rakenteen sen mukaan. Tässä tapauksessa mitoitusvoima tangoissa on yhtä suuri kanavan keskilinjan symmetrian takia ja tankovoiman mitoitusarvoksi tulee $15,8 \text{ kN}$ molemmissa tangoissa. Laskentatyökalu ilmoittaa tekstisolussa käyttämään tätä nimellisarvona tankojen mitoituksessa. Suoraa tankotyyppiä ei ole mahdollista sisällyttää ehdotuksena työkaluun, sillä tankotoimittajat vaihtelevat suuresti. Nimellisarvolla löytyy kuitenkin sopiva ratkaisu vertailemalla toimittajien taulukoita. Tämän lisäksi laskentatyökalu antaa suunnittelijalle lisätietona sen, ettei uuman jäykistäviä lisälevyjä tarvita tässä tapauksessa alapalkin ja ripustustangon korvakkeen liitoskohdassa eikä myöskään teräsrakennepalkin ja ripustustangon liitoskohdassa.

Oletustilanteen mukainen tapaus voidaan siis toteuttaa seuraavanlaisesti teräsrakennepalkin ollessa IPE160: Ohjauspalkiksi HEB100 hitsattuna teräsrakenteeseen ilman lisätuentaa. Alapalkiksi HEB120 ja jäykistekehäksi sekä ohjauspaloiksi $50 \times 40 \times 5$ kulmateräket. Tangot mitoitetaan niissä vaikuttavan vahvemman voiman mukaan siten, että ne kiinnittyvät standardikorvakkeilla, esimerkiksi Lisegan katalogista saatavilla Weld-on clevis type 73 ja Weld-on eye plate type 75 -osilla. Oletustilanteessa uumaa ei tarvitse jäykistää korvakkeiden kohdalta.

5.3.2 Erityistilanteen tulokset

Luvussa 5.2.2. esitellyn tilanteen mitoitus voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla, vino-tuennalla tai ilman. Rakenne on kanavan yläpuolen tilavaraukseltaan helpompi toteuttaa ilman vinotuentaa, joten käsitellään tämä tapaus ensisijaisena. Tarkastellaan ilman vino-tuentaa toteutettavan, kevyimmän mahdollisen rakenteen analyyttisestä ratkaisusta tarkastelukohteittain jaoteltua käyttöastetaulukkoa:

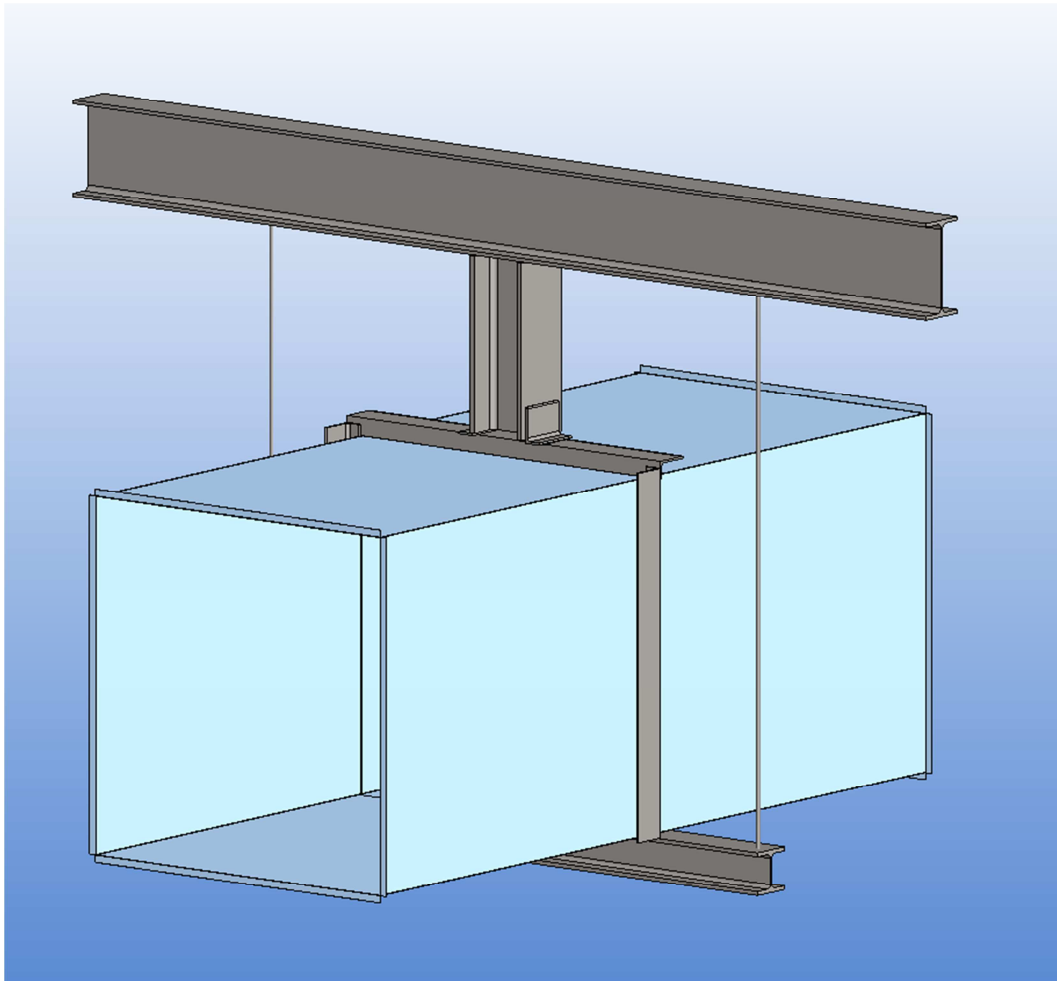
Taulukko 16. *Analyyttinen ratkaisu maanjäristysalueen kannakkeelle.*

Kuvaus	Arvo / Käyttöaste	Viite
Taivutuskestävyys	30 %	Kaava 6
Leikkauskestävyys	15 %	Kaava 10
Leikkauslommahduskestävyys	Merkityksetön	Kaava 13
Kestävyys taivutuksen ja leikkauksen yhteisvai- kutukselle	Merkityksetön	Kaava 10, Luku 3.4.5.
Kiepahduskestävyys	25 %	Kaava 17
Teräsrakennepalkin uuman leikkaus	66 %	Kaava 29, 31
Teräsrakennepalkin uuman poikittainen puristus	96 %	Kaava 29, 33
Teräsrakennepalkin uuman poikittainen veto	91 %	Kaava 29, 35
Teräsrakennepalkin laipan taivutus	50 %	Kaava 29, 36
Ohjauspalkin laipan ja uuman puristus	30 %	Kaava 29, 38

Taulukossa 16 on laskentatyökalulla iteroitu kevyin mahdollinen rakenne mitoitus-tilanteelle. Teräsrakennepalkkina on edellä mainittu IPE270 ja ohjauspalkiksi sopii HEB180. Riittäväksi alapalkkiprofiiliksi laskentatyökalu ilmoittaa HEB140 –profiilin. Tällöin rakenteen alapalkkiin kohdistuu konservatiivisessa tarkastelussa $187,9 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$ suuruinen taivutusvastus.

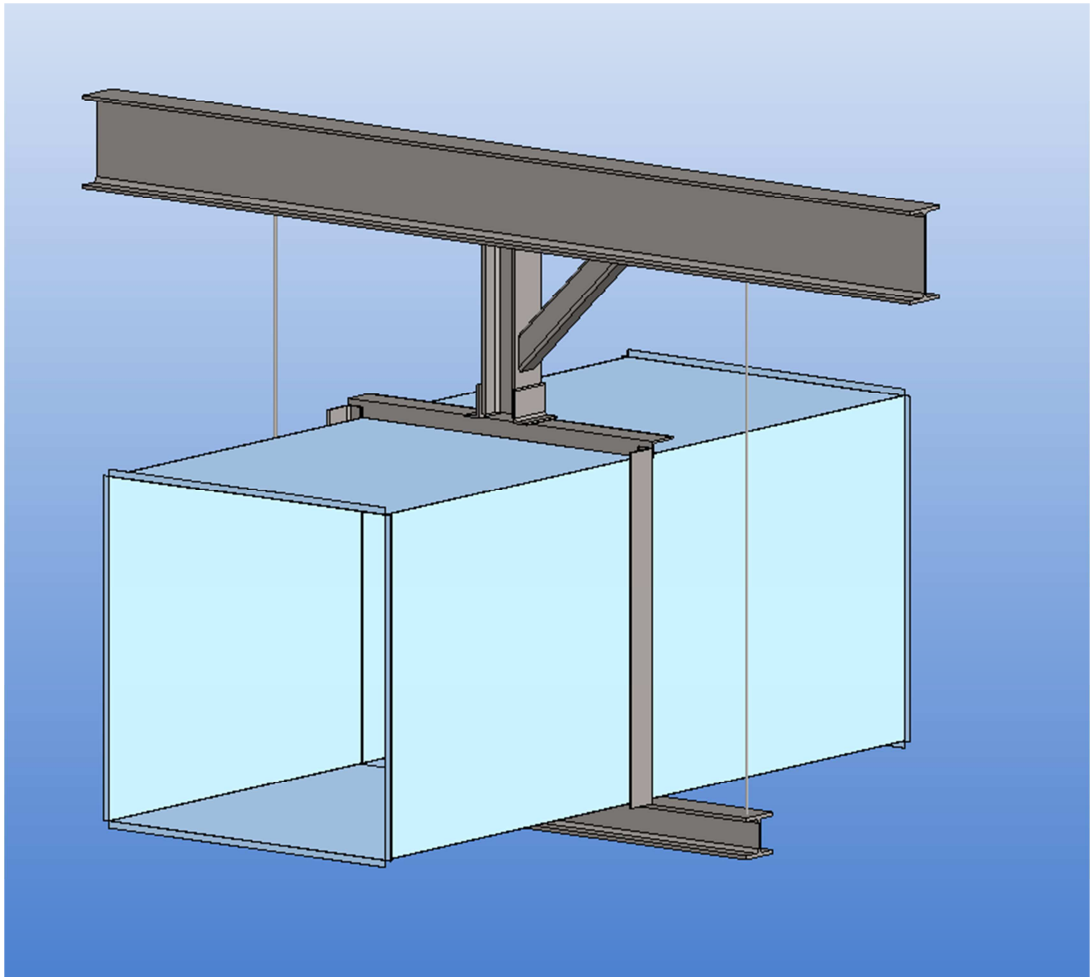
Teräsrakenteen ja ohjauspalkin liitoskohtaan kohdistuu 29,7 kNm vääntömomentti. Laskennallisesti liitoskohta kestää edellä mainituilla profiilivalinnoilla kuormituksen turvallisella alueella ilman lisätuentaa. Käyttöaste teräsrakennepalkin uumassa lähenee sallittua rajaa, mutta on vielä turvallisella puolella.

Ohjauspalat on oltava näin suurella kuormituksella mitoiltaan vähintään 100x50x6, jotta teräslevyjen hitsin kestävyys mitoitusarvo (Kaava 42) ei ylitä. Tällöin vallitseva resultanttivoima on 954,2 N/mm. Mikäli lisätuentaa käytetään, voidaan ohjauspalkki keventää ja teräsrakennepalkin liitoskohtaan kohdistuva pistemäinen momentti lähestyy nollaa ja vaikutus jakautuu suuremmalle alueelle. Tässä tapauksessa, mikäli edellisen tilanteen mukaista momenttivaikutusta ei ole, kevein ohjauspalkki, joka ei kiepahda tai taivu on HEB120. Tällöin voisi siis käyttää joko tätä suositusta tai vaikkapa yhtenäistä palkkiprofiilia sekä alapalkille että ohjaukselle (HEB140). Tällaisessa tapauksessa ohjauspalkki tulisi sitoa esimerkiksi vinotuella, ettei momenttivaikutus sen juuressa aiheuta deformaatiota teräsrakennepalkissa.



Kuva 45. Maanjäristysalueen kannakerakenne. (Vertex G4 Laitossuunnittelu 2013)

Kuvassa 45 on mallinnettu ilman lisätuentaa toteutettu kannake kyseiselle kuormitustilanteelle. Kanavan päällä on tilaa vain 495 millimetriä, joten ohjauspalkki on lyhyt. Tämän ratkaisun etuna onkin, että näin pieneen tilaan ei tarvitsisi rakentaa vinotukia erikseen, vaan kanava voitaisiin eristää tällaisenaan. Kuvassa 46 on esitetty toinen käytäntö ratkaisu, jossa käytetään lisätuentaa.



Kuva 46. Maanjäristysalueen kannakerakenne vinotuennalla toteutettuna. (Vertex G4 Laitossuunnittelu 2013)

Ohjauspalkin profiili on keveämpi, mutta liitoskohta vaatii lisätuennan vinoputkella. Tangoissa vallitsee tässä maanjäristystilanteessa 34 kN voimat, joiden perusteella täytyy valita sopivat tankorakenteet tilausosina. Teoriassa uuman jäykisteille ei ole tarvetta erityistilanteessa, mutta se on tapauskohtaisesti aina erikseen tarkastettava.

Kuvissa 45 ja 46 esitetyt kannakeratkaisut ovat molemmat laskennallisesti käypiä, mutta lopullinen valinta jää aina suunnittelijan harkintaan tilanteen mukaisesti. Laskentatyökalu antaa siis mahdollisimman vakioidusti laskennallisesti oikeellisia tuloksia, joita täytyy kuitenkin pohtia aina kokonaisuuden ja käyttökelpoisuuden kannalta.

6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän työn tavoitteena oli tutkia ja yhtenäistää voimalaitoskanavien kannakointiratkaisuja. Ydinasiana oli suunnitella uudenlainen kannakeratkaisu, jonka periaatteita voitaisiin laajentaa myös muihin yrityksessä käytettyihin kannaketyyppeihin. Tätä vaatimusta tukemaan laadittiin konseptisuunnittelussa muodostuneelle pääasialliselle kannaketyypille lujuuslaskentatyökalu, jota voidaan käyttää apuna kanavas suunnittelussa. Työn tuloksia käsittelevässä kappaleessa käytiin läpi kaksi erilaista esimerkkitalannetta, joissa laskentatyökalusta on hyötyä suunnittelijalle ja sen käyttö nopeuttaa koko suunnittelu-prosessia.

Kannakkeita tarkasteltiin ensin kokonaisuutena, jonka jälkeen tarkastelutasoa supistettiin jakamalla kannakkeet pääryhmiin tuentansa perusteella ja etsimällä niistä modulaarisuutta toteuttavia kokonaisuuksia ja osatoimintoja. Näiden perusteella luotiin vaatimuslistat sekä funktionaalinen hierarkiakaavio kannakkeen päätoiminnoista. Syntyneistä parametreista muodostui idea parhaasta ja eniten kehitystä kaipaavasta konseptista. Työn pääasiaksi muodostui yläpuolisesta tasosta kannakoidun kantikkaan vaakakanavan lujuuslaskentatyökalun kehittäminen. Konseptisuunnittelun jälkeen suoritettiin alustavat lujuuslaskelmat ja verifioitiin konseptin toimivuutta. Lujuuslaskentaa laajennettiin jatkuvasti järjestelmää silmällä pitäen, jotta laskentatyökalun periaatteet olisi mahdollista vakioida toimimaan mahdollisimman laajasti mille tahansa kanavakoolle ja kuormitukselle.

Laskentatyökalu toteutettiin Microsoft Excel 2010 -taulukkolaskentaohjelmalla funktiomuotoisesti ja eurokoodistandardin mukaisesti. Käyttäjän syötteet toteuttavat eri osa-alueiden laskutoimitukset silmukkamuodossa siten, että käyttäjän syöte saa aikaan aina uuden kierroksen. Laskentatyökalun tekstisolut kertovat jokaisen syöteen jälkeen osa-alueittain onko rakenne lujuusopillisesti kestävä. Laskenta perustuu analyttisiin ratkaisuihin, jotka ovat todellista tilannetta hieman konservatiivisempia. Elementtime-netelmällä suoritettu kiepahduskestävyyden tarkastuslaskenta osoitti rakenteella olevan analyttistä ratkaisua parempi kapasiteetti. Tätä tietoa voidaan hyödyntää mitoituksessa siten, että laskentatyökalussa määriteltyjä rakenteiden kestävyysmitoitussarvoja noudatetaan. Tällöin mitoitus pitäytyy aina turvallisella puolella myös rajatapauksissa.

Laskentatyökalun käyttö nopeuttaa kanavas suunnitteluprosessia merkittävästi, mikäli vallitsevat parametrit ovat suotuisia ja tiedossa. Lujuuslaskujen laajuudesta johtuen laskentatyökalukin vaatii tarkat parametrit vallitsevasta tilanteesta, suunnitellun rakenteen koosta ja siihen kohdistuvista voimasuureista. Kanavalinjaa ympäröivä teräsrakenne on tunnettava ja laskentatyökalu kykenee laskemaan vain tietyn, tässä työssä keskeisessä osassa olevan päätyypin kannakkeita.

Laskentatyökalussa on potentiaalia yleiskäyttöiseksi kannakelaskentaa nopeuttavaksi apuvälineeksi. Tätä varten sitä voisi edelleen kehittää kattamaan myös muunlaisia ripustuksia sekä kanavan muotoja. Tässä työssä kehitettiin kokonaan uudenlainen kannakointitapa, joka on lujuusominaisuuksiltaan merkittävä parannus nykytilanteeseen. Kannakkeeseen kehitetty laskentatyökalu parantaa sen käyttökelpoisuutta ja tehostaa suunnittelun nopeutta. Tällä on suoraa vaikutusta ajallisen säästön lisäksi myös taloudellisiin säästöihin suunnittelutyöhön käytetyistä resursseista. Suurempana järjestelmänä sen merkitys olisi entistä vaikuttavampi.

LÄHTEET

American Society of Civil Engineers. 1995. Structural design of air and gas ducts for power stations and industrial boiler applications. Virginia, Library of congress cataloging-in-publication data. 296 s.

Fabricius, F. 2003. Design for manufacture: Guide for improving the manufacturability of industrial products. Institute of product development, Technical university of Denmark. 59 s.

Ferrer, I.; Rios, J.; Ciurana, J.; Garcia-Romeu, M.L. 2009. Methodology for capturing and formalizing DFM knowledge. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, December 09, Elsevier ScienceDirect. s. 420-429 .

Haverinen, K. 1987. Kattilalaitoksen ilma- ja savukaasukanavien kehittäminen. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto. 38 s.

Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P. & Pakkanen, H. 2000. Höyrykattilatekniikka. 5. painos. Helsinki, Oy Edita Ab. 379 s.

Järvelä, R., Lehtinen, T., Kalamies, U., Huuhtanen, J., Nurro, P., Tuominen, T. 2006. Staattisesti kuormitettujen hitsausliitosten suunnittelu. Laajarunkoisten liikuntahallien rakenteellinen turvallisuus. Tutkimusraportti, VTT. 74 s.

Lehtonen, T. 2007. Designing modular product architecture in the new product development. Väitöskirja. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto. 229 s.

Lisega. 2014a. Spring hangers and spring supports. [WWW]. [Viitattu: 17.3.2014]. Saatavissa: <http://www.lisega.de/product-groups/spring-hangers-and-spring-supports-2.html>

Lisega. 2014b. Constant hangers and constant supports. [WWW]. [Viitattu: 17.3.2014]. Saatavissa: <http://www.lisega.de/product-groups/constant-hangers-and-constant-supports-2.html>

Maa- ja metsätalousministeriö. 2012. Energiatuotannon tekniikka – Leijupoltto. [WWW]. [Viitattu: 18.10.2013]. Saatavissa: http://www.bioenergiatieto.fi/default/www/etusivu/energian_tuotanto/energiatuotannon_tekniikka/polttotekniikka_kiinteille_polttoaineille/leijupoltto/.

Metso Power Oy. 2007. Design instruction: Supports and compensation of thermal movements. Julkaistu ohjeistus. 6 s.

Metso Power Oy. 2009a. Design instruction: Duct work insulation. Julkaistu ohjeistus. 1 s.

Metso Power Oy. 2009b. Design instruction: Virtaustekninen mitoitus. Julkaistu ohjeistus. 7 s.

Metso Power Oy. 2013a. Design instruction: Strength calculations. Julkaistu ohjeistus. 13 s.

Metso pulp and paper. 2013a. Fluidized bed boilers: Two efficient combustion methods to choose from. [WWW]. [Viitattu 16.10.2013]. Saatavissa: http://www.metso.com/pulpandpaper/recovery_boiler_prod.nsf/WebWID/WTB-090521-22575-B11CF?OpenDocument&mid=1FC65D0126EFCCD1C22575BD00566358.

Metso pulp and paper. 2013b. HYBEX boilers – Bubbling fluidized bed (BFB) combustion technology. [WWW]. [Viitattu 16.10.2013]. Saatavissa: [http://www.metso.com/energy/boiler_prod.nsf/WebWID/WTB-090517-22575-35FC6/\\$File/HYBEX.pdf](http://www.metso.com/energy/boiler_prod.nsf/WebWID/WTB-090517-22575-35FC6/$File/HYBEX.pdf).

Metso pulp and paper. 2013c. CYMIC boilers – Circulating fluidized bed (CFB) combustion technology. [WWW]. [Viitattu 16.10.2013]. Saatavissa: [http://www.metso.com/energy/boiler_prod.nsf/WebWID/WTB-090517-22575-9DCEB/\\$File/CYMIC.pdf](http://www.metso.com/energy/boiler_prod.nsf/WebWID/WTB-090517-22575-9DCEB/$File/CYMIC.pdf).

Niemi, E., Kemppe, J. 1993. Hitsatun rakenteen suunnittelun perusteet. Helsinki. Painatuskeskus Oy. 337 s. ISBN 951-37-1115-3.

Oy Kontino Ab. 2013. Tuoteluettelo: Teräkset. [WWW]. [Viitattu 11.3.2014]. Saatavissa: <http://tuoteluettelo.kontino.fi/>.

Outinen, H., Salmi, T. 2004. Lujuusopin perusteet. Tampere, Klingendahl Paino Oy. 464 s. ISBN 952-9835-64-7.

Pere, A. 2012. Koneenpiirustus 1 & 2. 11. painos. Espoo, Kirpe Oy.

Rautaruukki Oyj. 2010. Hitsatut profiilit EN 1993 –käsikirja. Otavan Kirjapaino Oy, Keuruu 2010. 608 s. ISBN 978-952-5010-02-2.

Rautaruukki Oyj. 2012. Rakenneputket EN 1993 –käsikirja. Otavan Kirjapaino Oy, Keuruu 2012. 688 s. ISBN 978-952-5010-51-0.

SFS-EN 1993-1-1. 2005. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto. 58 s.

SFS-EN 1993-1-2. 2005. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Rakenteen palomitoitus. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto. 75 s.

SFS-EN 1993-1-8. 2005. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten mitoitus. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto. 148 s.

SFS 5744. 2002. Kattilan, kanavien ja sähkösuotimien eristykset. Lämpöeristystyön suoritus. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto. 29 s.

Tampereen teknillinen yliopisto. 2010. Opinnäytetyön kirjoittaminen Tampereen teknillisessä yliopistossa. [WWW]. [Viitattu 23.8.2013]. Saatavissa: https://www.tut.fi/pop/opiskelu/opinnaytetyot/Opinnaytteen_kirjoittaminen_TTYssa.pdf.

Teivas, T. 1985. Toimintamoduulien käyttö kattilalaitoksen ilmakehävien suunnittelussa CAD-sovellutuksineen. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto. 57 s.

Toropainen, L. 2011. Vaativien kanavien vaatimusten mukainen mitoitus kattilalaitoksessa. Diplomityö. Varkaus. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 142 s.

Vallhagen, J.; Madrid, J; Söderberg, R.; Wärnefjord, K. 2013. An approach for producibility and DFM-methodology in aerospace engine component development. 2nd International Through-life Engineering Services Conference 2013, Elsevier ScienceDirect. s. 151-156.

LIITE 1: LASKENTATYÖKALUN OHJEKUVA

**Info sheet of calculation tool for
overhead mounted, single-beam guided
horizontal rectangular duct**

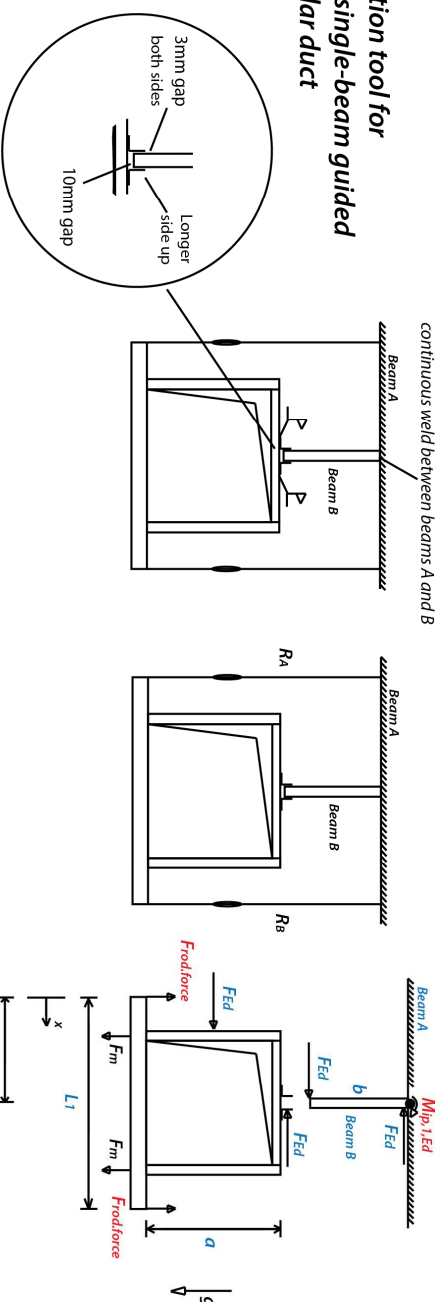
Antti Suutarinen, 16.7.2014, rev.0

Legend:

Inputs

Results

Information for designers



Recommended attachment to bottom and upper beams is done using

Lisega Weld-on clevis type 73 and Weld-on eye plate type 75 parts

Guiding beam and supporting hanger rods need to be in line.

It is essential to position the flange of the guiding beam perpendicular to the face of the guiding stoppers.

If the guiding flange is not perpendicular to the stoppers,

the construction will be more flexible under stress and needs additional calculations.

If the overhead steel structure beam is parallel to the duct, the steel structure beam needs to be **reinforced**.

However, in this case, do not turn the guiding beam 90 degrees. Keep the flange perpendicular to the stoppers.

There is no need for extra welds between the stiffener and the duct.

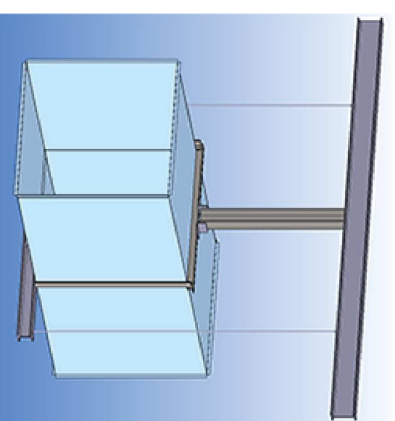
The stiffener acts as a self-stiffening perimeter around the duct and it carries the forces off the guiding point.

Stoner-Rohlf calculations take into account the moment caused by

load against the side of the duct and longitudinal thermal expansion of the duct.

Initial tension in hanger rods R1 and R2 is recommended so that in operational state the guiding beam is as centered as possible in terms of the stoppers.

However, if the guiding beam is off-centre only a few millimetres, there is no need for initial tension.



Intermediate results and additional information for designers

[illegible]